

# 水陆两栖跨介质仿生机器人研究进展

秦博扬<sup>1</sup> 李磊<sup>1,2</sup> 孔诗涵<sup>1</sup> 喻俊志<sup>1</sup>

**摘要** 水陆两栖机器人凭借其跨介质运动能力,在巡检、侦察、生态监测等多个领域展现出广阔的应用前景.仿生学通过借鉴水陆两栖动物的形态结构与运动策略,为提升机器人的环境适应性与运动机动性提供重要的设计思路.首先,系统梳理具有不同形态特征的典型水陆两栖生物,并阐明其推进机制对机器人设计所产生的双向促进作用.其次,以推进策略为主线,将现有两栖机器人划分为采用统一驱动的单推进机制(包括鳍推进、刚性肢体推进、柔性肢体推进及连续体波推进)以及采用不同驱动方式的混合推进机制,分别介绍各类代表性仿生两栖机器人原型样机,并分析各种推进方式在不同介质的适应性变化及效能.随后,总结感知、驱动与控制等关键技术的当前发展状况,比较不同推进模式下控制策略的共性与差异.最后,结合跨介质多场景运动、具身智能及物理智能等前沿理念,探讨水陆仿生两栖机器人未来的研究方向与应用前景.

**关键词** 水陆两栖机器人;跨介质运动;仿生机器人;推进策略

**引用格式** 秦博扬,李磊,孔诗涵,喻俊志.水陆两栖跨介质仿生机器人研究进展.自动化学报,2026,52(5):882-908

**DOI** 10.16383/j.aas.c250507 **CSTR** 32138.14.j.aas.c250507

## Research Advances in Amphibious Cross-medium Bionic Robots

QIN Bo-Yang<sup>1</sup> LI Lei<sup>1,2</sup> KONG Shi-Han<sup>1</sup> YU Jun-Zhi<sup>1</sup>

**Abstract** Amphibious robots, capable of cross-medium locomotion, exhibit considerable potential and prospects in applications such as inspection, reconnaissance, and ecological monitoring. Drawing inspiration from the morphological structure and locomotion strategies of amphibious animals, bionics provides essential design principles for enhancing environmental adaptability and maneuverability of robots. This paper first presents a systematic review of representative amphibious organisms with diverse morphological characteristics and elucidates the bidirectional interaction between propulsion mechanisms and robotic design. Subsequently, using propulsion strategy as the primary classification criterion, existing amphibious robots are categorized into two main types. The first type utilizes unified actuation with single propulsion mechanisms, including fin propulsion, rigid limb propulsion, flexible limb propulsion, and continuous body wave propulsion. The second type adopts hybrid propulsion mechanisms that employ distinct actuation modes. Representative prototypes of bionic amphibious robots for each category are introduced, followed by an analysis of their adaptability and efficacy across different media. Furthermore, the current development state of key enabling technologies, including perception, actuation, and control, is comprehensively reviewed, and the commonalities and differences of control strategies under different propulsion modes are compared. Finally, by incorporating emerging concepts such as cross-medium multi-scenario locomotion, embodied intelligence, and physical intelligence, this paper discusses future research directions and potential application prospects for bionic amphibious robots.

**Keywords** amphibious robots; cross-medium locomotion; bionic robot; propulsion strategy

**Citation** Qin Bo-Yang, Li Lei, Kong Shi-Han, Yu Jun-Zhi. Research advances in amphibious cross-medium bionic robots. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(5): 882-908

收稿日期 2025-09-29 录用日期 2026-01-12

Manuscript received September 29, 2025; accepted January 12, 2026

国家自然科学基金(62233001, T2121002, 62473236, 62403013),北京市科技新星计划交叉合作课题(20240484499),国家资助博士后研究人员计划(BX20240010),中国博士后科学基金(2024M760112)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62233001, T2121002, 62473236, 62403013), Beijing Nova Program (20240484499), Postdoctoral Fellowship Program and China Postdoctoral Science Foundation (BX20240010), and China Postdoctoral Science Foundation (2024M760112)

本文责任编辑 刘志杰

Recommended by Associate Editor LIU Zhi-Jie

1. 北京大学先进制造与机器人学院 北京 100871 2. 北京大学海洋研究院 北京 100871

近年来,水下机器人和陆地机器人的研究已取得大量成果,但能够同时在水域与陆地中高效运动的水陆两栖机器人仍然相对较少.水陆两栖机器人不仅为探索复杂非结构化环境中的自主导航策略提供理想的平台,也为理解动物运动模式、研究步态力学<sup>[1]</sup>、分析生态系统状态<sup>[2]</sup>以及探究不同介质下的推进原理<sup>[3]</sup>提供重要的物理模型.在此过程中,仿生两栖机器人不仅汲取生物学的灵感,其实

1. School of Advanced Manufacturing and Robotics, Peking University, Beijing 100871 2. Institute of Ocean Research, Peking University, Beijing 100871

验结果和运动表现也可反向推动对生物运动机理及其适应性策略的理解, 构建连接机器人学与生物学的桥梁。

在实际应用中, 水陆两栖机器人在侦察、测绘、离岸水雷探测、水质监测等领域具有广阔前景, 其关键优势在于能够在不同运动模式间实现快速、平滑的切换。然而, 设计高效的水陆两栖机器人仍面临诸多挑战, 核心问题在于如何兼顾陆地承载能力、机动性以及水下的流体动力性能。尤其是在水陆交界区域(浅滩区), 波浪、沉积物作用、不均匀地形及各种障碍物的存在, 使得机器人运动成为一个多因素、多物理现象交织的问题, 需要创新的推进机制和控制策略。

受生物启发的仿生水陆两栖机器人通过模拟螃蟹、蝾螈、海龟、蛇、青蛙等动物的体型结构和运动方式, 已经在机动性、水陆转换速度和越障能力上表现出显著优势。自 1996 年首个自主螃蟹仿生机器人“Ursula”<sup>[4]</sup> 问世以来, 基于不同两栖动物的仿生机器人不断涌现。近年来, 柔性驱动技术如气动人工肌肉(pneumatic artificial muscle, PAM)、流体弹性体执行器(fluidic elastomer actuator, FEA)、形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)及电活性聚合物(electroactive polymer, EAP)<sup>[5-9]</sup>等, 为实现复杂的水陆运动提供新的可能; 与此同时, 强化学习、人工神经网络等智能控制方法的发展, 正使机器人具备更强的自主性和适应性。特别是随着物理智能(physical intelligence)<sup>[10]</sup>的提出, 研究者开始强调材料特性、结构设计与环境交互所固有的智能性, 探索无需复杂计算即可实现自适应行为的

可能性, 为两栖机器人的未来发展提供新的思路。

总体而言, 仿生水陆两栖机器人作为一个新兴研究领域, 正日益成为学术界和工业界关注的热点。其设计核心涉及生物学机理、推进机制、驱动方式、能量供应与控制策略等多个方面, 不仅为理解自然界生物运动提供新的研究途径, 也为实现多环境自主运动和发展具备物理智能的新一代机器人奠定基础。

## 1 生物学基础与启发

### 1.1 形态结构与推进机制

生物的推进机制与其形态结构高度相关, 如图 1 所示, 通常可分为单一推进机制与混合推进机制<sup>[11]</sup>。单一推进机制依赖某一结构完成运动, 如体波推进由身体波动实现, 典型代表为鳗鱼与蛇; 鳍推进(fin propulsion)通过鳍振动产生推力, 见于金枪鱼、鳐鱼和海龟; 肢体推进则依赖四肢或附肢, 如青蛙、螃蟹与章鱼。相比之下, 混合推进机制体现出形态与功能的协同利用, 例如蝾螈既可利用体波在水中前进, 又能凭借四肢在陆地行走; 鳄类则在水中以尾部为主推进, 在陆地上转为四肢驱动。形态结构支持的混合推进能使生物在复杂跨介质环境中的适应性提高, 能量效率比单一模式更高, 稳定性进一步提升。因此, 理解推进方式必须结合生物形态学特征, 本节将从水陆两栖动物的形态结构出发, 分类探讨各种推进机制。

#### 1) 单一推进机制

体波推进机制是无鳍类或长体型动物最典型的

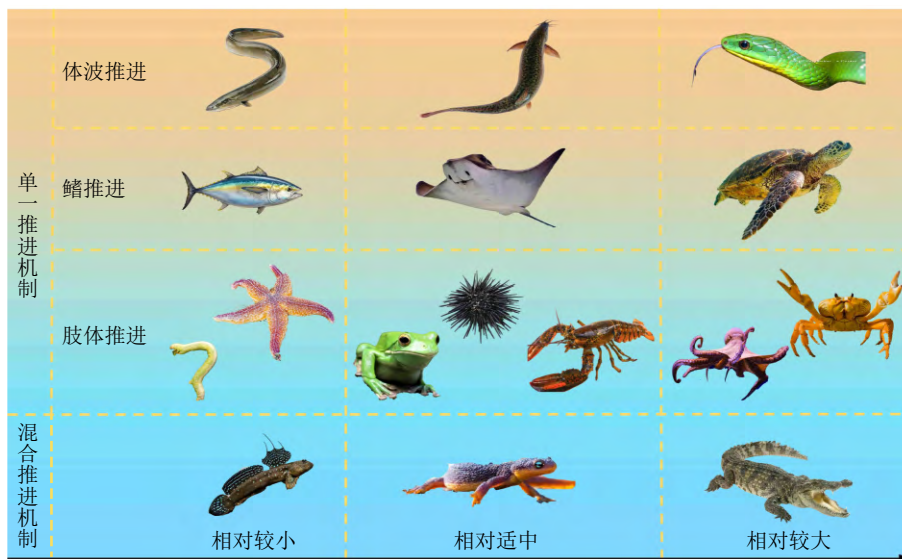


图 1 不同推进机制的两栖动物

Fig.1 Amphibians with different propulsion mechanisms

运动方式之一. 其核心特征是沿身体纵轴产生连续传导的横向波动, 通过与周围流体或基底的相互作用, 形成前向推力. 这种推进方式广泛见于水生鱼、蛇类等, 具有推力连续、稳定性强以及对复杂环境高度适应的特点. 流体动力学研究表明, 体波推进过程中, 身体波动会在尾迹中产生规则的涡环或涡街结构, 推动周围介质形成反作用力, 从而实现推进; 不同动物在体波参数上存在明显差异, 但都能通过对波长、波幅与频率的协调组合实现较高的推进效率. 与此同时, 动物能够灵活地调整这些运动学参数来控制速度、加速性能及机动性, 例如通过增大波幅来提升推力, 或通过提高摆动频率来获得更快的运动速度.

鳗鱼是典型的鳗形游泳者, 鳗鱼独特的细长流线型躯体结构是其实现高效、分布式波形推进的基础: 连续的背-尾-臀中轴鳍可增大侧向受水面积, 而某些种类在低速时还会借助胸鳍改善机动, 这些外形特征直接影响推进波长和动量传递<sup>[12]</sup>. 肌肉大致可分为两个不同的功能组<sup>[13]</sup>, 呈红肌 (靠近体表, 供持续巡航使用) 与白肌 (占大部分体积, 用于加速/爆发) 的分布, 使鳗鱼能通过调整肌肉做功主动改变身体刚度, 将身体固有频率与尾摆频率匹配以降低弯曲代价; 与此同时, 脊柱与椎体数目也会影响力学响应 (见图 2(a) 鳗鱼肌肉解剖图<sup>[12]</sup>)<sup>[14]</sup>. 在皮肤与表面结构方面, 通常鳗鱼鳞片退化并覆有黏液, 且皮肤表现出纵向各向异性 (见图 2(b) 海七鳃鳗、长吻雀鳢、水生蝮蛇皮肤表面图<sup>[12]</sup>), 这一属性有助于沿体轴传递应力、影响弯曲刚度与推进波形, 从而参与力传输与阻力调节. 综合实验与数值模型表明, 鳗鱼的外形、皮肤力学与肌肉时序需协同优化, 即将身体刚度、尾摆频率与肌肉激活模式相匹配, 才能在不同速度与流态下实现较高的推进效率与能量经济性, 这也解释了鳗形体态在功能上的一致性与多样性并存.

在运动学上, 鳗鱼的体波振幅从头部向尾部逐渐增强 (见图 2(c) 鳗形游动运动学参数图<sup>[12]</sup>), 波长较短, 使得整个身体均参与推力生成. 高分辨率流体动力学研究表明, 鳗鱼在游动过程中产生的尾迹具有复杂的三维涡环结构, 其与体波相位密切对应. 这些涡的时空分布不仅决定了推力方向和大小, 也影响了推进效率. 与局限在尾部的推进方式相比, 鳗鱼这种“全身推进”在低速和转向时表现出优势, 能够在稳定性与灵活性之间实现平衡. 现有研究指出, 理解这种高效游动模式需要跨学科方法, 结合生物学、运动学与流体力学的多角度证据. 然而, 上述领域目前尚缺乏系统性整合, 仿生机器人开展跨尺度、跨学科的综合验证提供了一种可行途径.

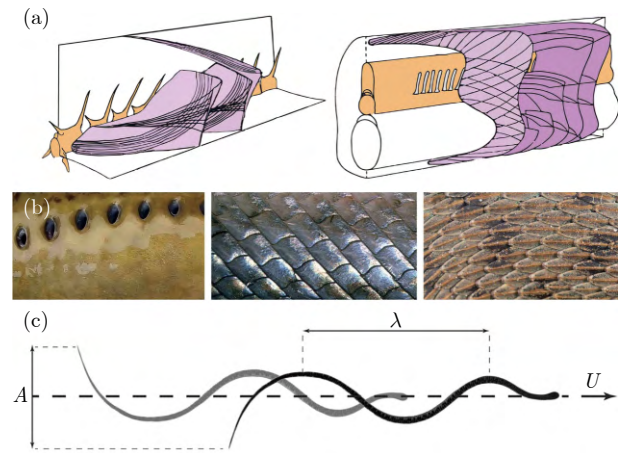


图 2 鳗形目形态和运动图<sup>[12]</sup>, 经许可转载自文献 [12], ©Wiley, 2024

Fig. 2 Diagram of morphology and locomotion in anguilliformes<sup>[12]</sup>, reproduced with permission from reference [12], ©Wiley, 2024

蛇类在水中主要依靠身体产生连续的横向波动实现推进 (见图 3(a) 海蛇形态图<sup>[12]</sup>), 这与鳗鱼等鳗形鱼类的运动机制存在显著的运动学相似性. 与陆地上的“侧向波动”不同, 水中推进时蛇需要在流体中产生推力和升力的组合效应 (见图 3(b) 压力阻力分析图<sup>[12]</sup>、图 3(c) 摩擦阻力分析图<sup>[12]</sup>), 以维持速度和姿态稳定<sup>[15]</sup>.

在最新对草蛇属 *Natrix tessellata* 的研究中, 首次利用三维粒子图像测速技术系统地量化了蛇类游泳时的尾迹涡结构. 研究通过与既有实验和计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟结果进行对比 (见图 4(a) 鳗鱼尾迹<sup>[15]</sup>、图 4(b) 七鳃鳗尾迹<sup>[15]</sup>、图 4(c) 典型鳗形类游泳 CFD 模型<sup>[15]</sup>、图 4(d) 蛇类尾迹<sup>[15]</sup>), 发现蛇类游动产生的尾迹结

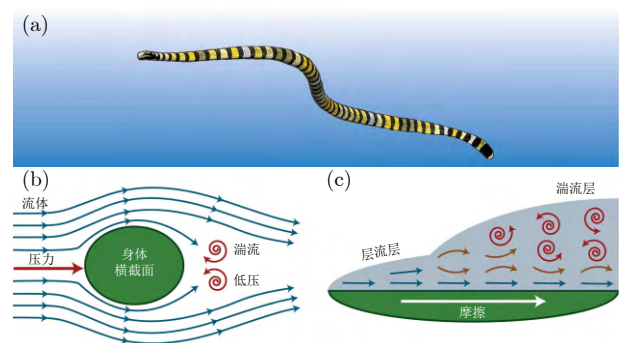


图 3 鳗形目游动过程中的流体-结构相互作用图<sup>[12]</sup>, 经许可转载自文献 [12], ©Wiley, 2024

Fig. 3 Diagram of fluid-structure interaction during the swimming of anguilliformes<sup>[12]</sup>, reproduced with permission from reference [12], ©Wiley, 2024

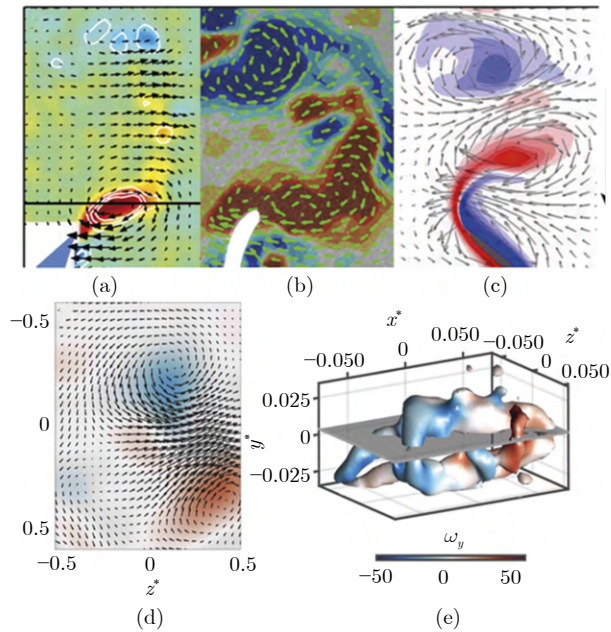


图4 鳗鲡目形态与运动特性<sup>[15]</sup>, 经许可转载自文献 [15], ©The Company of Biologists, 2023

Fig.4 Morphology and locomotion characteristics of anguilliformes<sup>[15]</sup>, reproduced with permission from reference [15], ©The Company of Biologists, 2023

构在二维平面上呈现明显的偶极涡对, 但三维可视化结果 (见图 4(e) 三维涡旋结构图<sup>[15]</sup>) 显示该涡旋结构比二维切面图更为复杂, 呈现多重交织的三维涡环系统<sup>[15-18]</sup>. 而不同类型的蛇类运动被归类为四种主要模式: 直线运动、横向波动、侧向弯曲和手风琴运动<sup>[19]</sup>, 其不同的运动方式对仿生蛇类具有重要启发性。

## 2) 鳍推进

鳍推进是水生动物最主要的运动方式之一, 其核心在于通过鳍或肢体与水体相互作用产生推力, 从而实现前进、转向和速度调节. 鱼类推进主要依赖沿身体延展的波状摆动, 并结合尾鳍产生的强劲摆动来形成推力. 这种模式被称为体 (尾鳍) 推进 (body and caudal fin locomotion, BCF), 其关键在于身体波动与尾鳍运动的耦合, 从而实现高效推进. 尾鳍的展弦比在推进性能中起核心作用: 长而窄的尾鳍通常出现在高速巡游鱼类中, 提升长距离游泳效率; 较宽阔的尾鳍则增强机动性, 更适合急转弯和复杂环境中的运动. BCF 推进还赋予鱼类卓越的快速启动能力, 依赖神经驱动的瞬时身体弯曲, 在极短时间内实现逃逸加速, 体现神经控制与肌肉协调的优势. 柔性尾鳍通过调控弯曲刚度与振动幅度, 能够优化推力方向并降低横向能量损失, 从而显著提高推进效率<sup>[20]</sup>, 这为软体机器鱼的设计提供

了启发。

与此相对, 蝠鲼等软骨鱼类则主要依赖胸鳍推进 (median and paired fin locomotion, MPF), 其中胸鳍扑动在推进过程中发挥主导作用. 蝠鲼为典型的 MPF 推进模式: 胸鳍大幅度起伏拍动, 形成连续的涡环结构, 既能产生高效推力, 又能维持较强的机动性. 近期 Menzer 等<sup>[21]</sup> 的计算流体力学模拟研究进一步揭示了蝠鲼胸鳍拍动的水动力学机制. 如图 5<sup>[21]</sup> 所示, 胸鳍俯仰比 (pitching ratio, PR) 对推力和效率具有显著影响: 较低的 PR 可形成更优化的涡流生成与脱落, 提高推进效率; 高 PR 情况下鳍底部形成的前缘涡会产生寄生低压, 阻碍推力. 此外, 适度提高弯曲比 (bending ratio, BR) 可略微降低能耗, 而当 BR = 0.83 与 PR = 0.67 结合时, 推进性能获得进一步提升. 这一发现加深了我们对 MPF 推进机理的理解, 并为仿生蝠鲼机器人研发提供了理论支撑, 使其能够模仿生物原型的高效率与高灵活性。

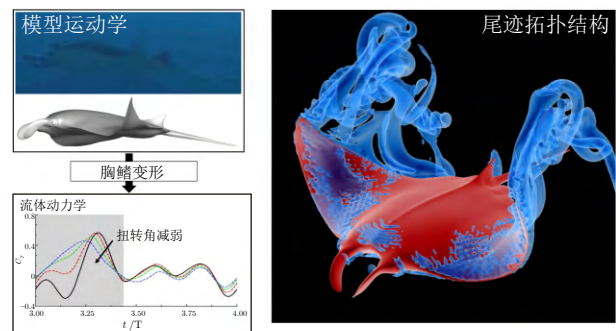


图5 蝠鲼胸鳍运动流体动力学机制图<sup>[21]</sup>, 经许可转载自文献 [21], 遵循 CC BY 许可协议, 2022

Fig.5 Hydrodynamic mechanism diagram of pectoral fin locomotion in manta rays<sup>[21]</sup>, reproduced with permission from reference [21], under the CC BY license, 2022

海龟同样采用鳍推进方式, 其同源性是它们的腰带位于胸腔内部<sup>[22]</sup>, 胸腔完全包含在壳内 (见图 6(a) 斑纹伪龟的前肢和后肢结构图<sup>[23]</sup>). 其前肢演化为宽大而有力的鳍状肢, 是主要的推进器官; 后肢则更多地承担方向控制与姿态稳定的作用. 同时, 海龟利用腰带旋转实现对肱骨与股骨的前伸与回收 (见图 6(b) CT 扫描肱骨和股骨图<sup>[23]</sup>), 从而优化游泳时的能量使用率. 前肢在前行时尽量减小阻力, 而在后掠时则产生显著升力, 从而推动身体前进<sup>[23]</sup>. 当海龟肱骨延长平行于壳的长轴时, 可以通过操控前肢方向来实现腰带的偏航旋转 (见图 6(c) 海龟前肢 CT 扫描图, 从左至右依次为侧视图、背腹视图、前视图<sup>[23]</sup>). 不同于多数鱼类依靠身体波动前进, 海龟利用这种翼型推进方式在长距离游泳中展现出高效率与持久力。

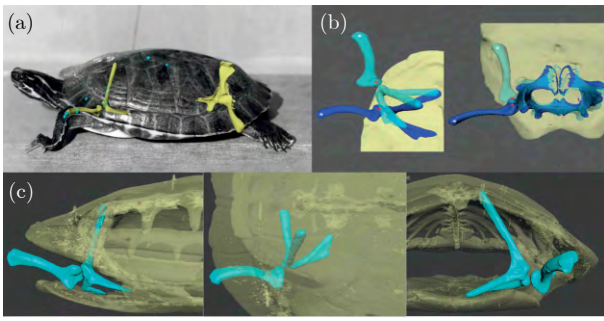


图 6 斑纹伪龟及其 CT 扫描结构图<sup>[23]</sup>, 经许可转载自文献 [23], ©The Company of Biologists, 2019

Fig. 6 Digrams of *Pseudemys concinna* and its CT scan structures<sup>[23]</sup>, reproduced with permission from reference [23], ©The Company of Biologists, 2019

### 3) 肢体推进

肢体推进机制本质上是通过生物体与环境的力学互动(流体或固体界面)实现位移的策略,其效能高度依赖体型尺度所决定的物理约束.小体型生物主要受黏性阻力主导,运动依赖于表面附肢与流体的精细互动;大体型生物则受惯性力控制,需协调多肢克服重力并管理机械能;中体型生物处于过渡区,需在游泳与跳跃中动态平衡流体动力与重力效应,其推进机制展现出独特的可塑性.

青蛙是中等体型生物在流体与陆地环境中实现多模态运动适应性的典型代表.其推进机制的核心在于后肢的幂次爆发系统,能够在不同介质中实现高效推进.

脚蹼驱动的后肢划水是青蛙游泳时最核心的推进手段,其运动模式是流体动力学长期优化作用下形成的复杂协调结果.游泳时通过骨盆肌肉带动背部骨骼(见图 7(a) 青蛙背部骨骼和骨盆肌肉解剖<sup>[24]</sup>),实现髌、膝、踝等关节以高度同步的伸展序列产生脚蹼的大幅后掠<sup>[24]</sup>,脚蹼在伸展期通过增大作用面积并与水体相互作用形成推力和升力(见图 7(b) 脚蹼伸展期形成推力与升力);在回收期则尽量减小阻力以完成回收动作.肌肉与肢段形态的耦合使得力输出与水动力负载匹配,从而在保证爆发力的同时避免过度能量浪费;通过对青蛙后肢简化模型的分析可以得出(见图 7(c) 简化的青蛙后肢模型,显示肌肉内杠、外杠、肌肉长度和脚踝角度<sup>[25]</sup>),脚蹼的形状展开、掠角变化以及划动速度的时序共同决定了推力-升力的分配与整体推进效能<sup>[25]</sup>.总体来看,青蛙的后肢划水构成了一套融合肢体形态、肌肉动力学及精细时空运动控制的流体动力学优化机制.

青蛙在陆地跳跃中展现出较高的弹性能量存储与释放效率,其后肢肌肉与肌腱形成了高度协同的动力系统.跳跃前,肌肉通过等长收缩将能量暂时

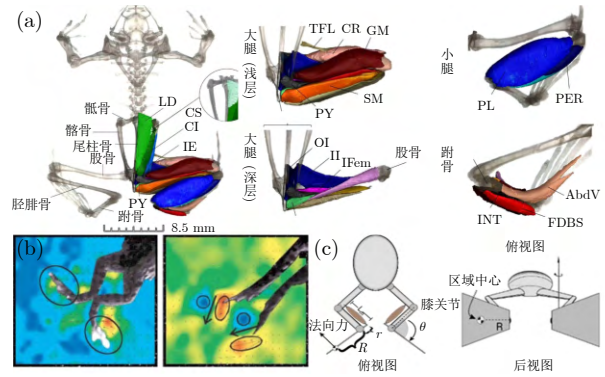


图 7 青蛙肌肉解剖及其模型图<sup>[24-25]</sup>, 经许可转载自文献 [24-25], ©Wiley, 2024; ©Springer Nature, 2013

Fig. 7 Digrams of frog muscle anatomy and its model<sup>[24-25]</sup>, reproduced with permission from reference [24-25], ©Wiley, 2024; ©Springer Nature, 2013

储存在肌腱的弹性组织中;起跳瞬间,这些能量得以迅速释放,产生远超单纯肌肉收缩的功率输出,从而实现高效而有力的腾跃<sup>[26]</sup>.值得注意的是,该肌腱-肌肉系统在不同介质条件下表现出功能重构特性:在游泳时,肌腱可通过弹性阻尼缓冲水流作用力,稳定后肢运动;在陆地跳跃时,则转换为储能与释放的装置,帮助完成远距离跃迁.这一系统为仿生两栖机器人的设计提供了灵感.

### 4) 混合推进机制

混合推进机制是指生物体为适应异质性环境(如水陆交界),演化出的能够整合或切换多种运动模式的能力.这种机制的核心优势在于其能量效率的最大化.例如,水的密度是空气的约 800 倍,黏度约 50 倍,这意味着在水中产生推力与在空气中支撑体重所需的力学策略截然不同.成功的混合推进者,如鳄鱼和弹涂鱼,通过进化出的形态和神经控制策略,能够在不同介质中将运动成本优化至最低.从仿生学角度看,量化这些生物的动力学和运动学参数是开发高性能两栖平台的基础.本节将针对典型实例弹涂鱼对混合推进机制进行介绍.

弹涂鱼作为最典型的混合推进机制的生物,其胸鳍由延长的鳍基骨“鳍节”与鳍条构成两个可动段,并通过肩关节与鳍内关节形成双铰链结构.这种独特形态让胸鳍既能在水中配合体轴与尾鳍推进,又能在陆地上作为主要“着地器官”承担推进与支撑(见图 8(a) 成年弹涂鱼骨骼图<sup>[27]</sup>).可将胸鳍运动划分为推进相与恢复(摆动)相;在陆地上,推进相等同于“支撑期”,恢复相等同于“摆动期”,体现出从以流体剪切(阻力)为主到以地面反作用力为主的控制逻辑切换,这是“混合推进”的核心生物学根基.

定量运动学研究表明, 弹涂鱼的胸鳍在陆地与水中启动了截然不同的运动学“模板”, 但这种差异反映了节奏与力学策略的转换, 而非简单的幅度放大或缩小<sup>[28]</sup>. 在陆地上, 单次划动周期更长、推进相占比更高, 胸鳍以较长的接触支撑期换取稳定与更大的地面反作用力; 在水中, 划动更短促、频率更快, 胸鳍动作被调制为更注重流体交互以减少阻力和维持滑行. 一个显著的特征是依靠磁感神经实现在垂直位移方向上的相位反转: 陆地推进期胸鳍呈向下姿态以压迫基底并产生推进力, 而在水中推进期则表现为向上姿态以调节流体路径并产生升力分量; 两种环境下这一垂直位移的时序与峰值出现时刻也显著不同, 反映出从以地面反作用力为主到以流体动力为主的控制逻辑切换. 多变量分析进一步支持这一结论: 环境因素能显著区分两类运动模式, 说明胸鳍并非在两栖场景中重复同一动作, 而是按需选择不同的运动学策略以适应媒介特性的差异.

在水中, 弹涂鱼的胸鳍与体轴及尾鳍协同配合, 其主要任务是维持身体稳定和转向, 同时辅以基于阻力的划水动作来提供有限推进. 恢复期的胸鳍动作往往伴随“羽化”, 即通过调整鳍条角度来减小迎水面积, 从而有效降低阻力, 保证连续划动的流畅性. 在陆地环境中, 胸鳍的刚性与柔性发生反向形变(见图 8(b) 弹涂鱼的磁感生物特征及运动策略<sup>[28]</sup>): 它与尾部形成“三脚”式的受力格局, 不仅要在侧向与后向产生推进力, 还要提供足够的向下支撑来对抗重力与摩擦. 为了提高推进效率, 胸鳍会显著增加前伸幅度, 从而拉长步幅, 使身体能够在坚实基

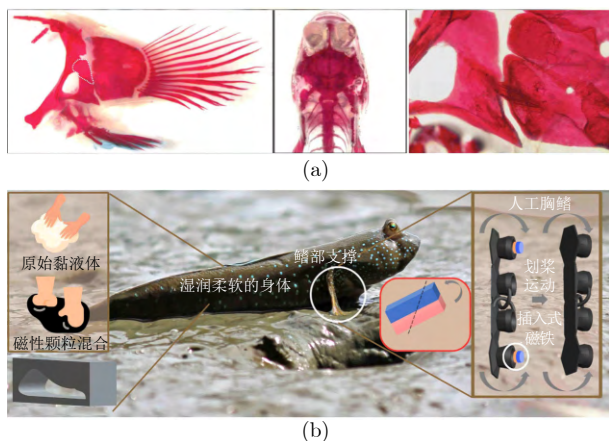


图 8 弹涂鱼运动策略及生物学特征图<sup>[27-28]</sup>, 经许可转载自文献 [27-28], ©Springer Nature, 2018; 遵循 CC BY 许可协议, 2024

Fig.8 Diagrams of locomotion strategies and biological characteristics of mudskippers<sup>[27-28]</sup>, reproduced with permission from reference [27-28], ©Springer Nature, 2018; under the CC BY license, 2024

底上实现更大距离的跃动<sup>[29]</sup>. 综合来看, 弹涂鱼的胸鳍在两种介质中展现出灵活的力学策略: 在水中更注重协助与稳定, 而在陆地则转为主要驱动与支撑, 这种切换正是“混合推进”机制的核心体现.

## 1.2 感知与环境交互

### 1) 生物感知

水生和半水生两栖动物, 包括蝌蚪和一些成体蛙类, 拥有皮肤机械感受器, 这些感受器能够将压力、水流和接触等刺激转化为神经信号, 用于姿态和方向控制. 经典的电生理学研究鉴定了蛙类皮肤中多类机械感受器, 并描述了它们对压入刺激和压力刺激的响应特性, 表明皮肤输入能够为运动控制中的姿态与动作校正提供快速反馈. 行为学和神经生理学数据表明, 这些触觉、压力通道有助于在流水中实现趋流性和方向调整: 蝌蚪会利用类似侧线的系统和皮肤机械感受器感知水流模式, 从而调整身体姿态, 这进一步支持了压力感应在游泳中主动稳定作用的重要性. 这些研究结果表明, 仿生两栖机器人在设计中可借鉴皮肤机械感受器的多模态感知机制, 通过集成分布式压力与触觉传感, 实现对复杂水流环境的实时感知与姿态稳定控制.

水生蛙类和蝌蚪将视觉线索与来自侧线系统的流体动力学信息整合, 用于导航和捕食. 侧线系统能够探测水流(流动、涡旋)的时空模式, 这些信息与视觉场景相互补充, 使蛙类即便在低能见度条件下, 也能进行趋流定向并探测附近的移动物体. 比较神经解剖学和功能研究, 侧线与视觉通路在中脑中存在汇聚, 支持了这种面向生态相关行为的多传感器融合<sup>[30]</sup>.

机器人研究越来越多地采用多传感器融合架构, 将视觉、触觉、压力感应、惯性、运动线索以及本体感觉结合起来, 以改善在复杂动态环境中的定位与路径规划. 近期研究表明, 将机械感知输入与视觉映射融合, 可以减少对计算开销较大的单一视觉的依赖, 同时提高在遮挡和光照变化下的鲁棒性<sup>[31]</sup>, 这一原理为仿生两栖机器人实现更高水平的智能感知与自主决策提供了参考.

### 2) 控制策略

两栖动物的运动控制依赖脊髓中分布式的中枢模式发生器 (central pattern generators, CPG), 这一神经网络无需高阶脑部参与即可自主产生节律性运动模式. 在蝌蚪、蝶螈、七鳃鳗<sup>[32]</sup> 等水生阶段, 轴向 CPG 分布于整个脊髓两侧, 驱动身体轴向波动实现游泳. 如图 9<sup>[33]</sup> 所示, 当进入变态发育期, 如非洲爪蟾 (*xenopus laevis*) 从幼体到成体, 控制逐渐转向肢体主导的推进, 并形成独立的肢体 CPG, 其

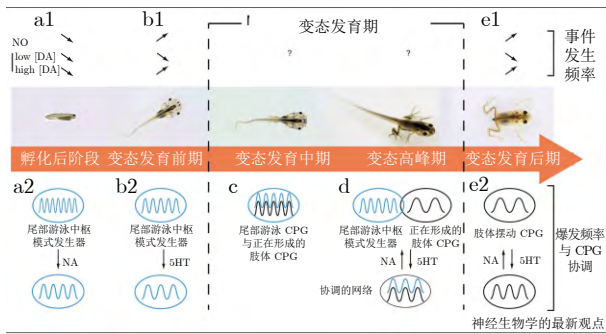


图9 非洲爪蟾 CPG 的生长过程调节图<sup>[33]</sup>, 经许可转载自文献 [33], ©Elsevier, 2019

Fig.9 Diagram of the growth regulation process of CPG in *xenopus laevis*<sup>[33]</sup>, reproduced with permission from reference [33], ©Elsevier, 2019

最初由轴向系统驱动, 随后可与轴向 CPG 协同或独立运作<sup>[34]</sup>. 这种多模态运动的神经网络结构通过神经调制实现发育期和环境温度等条件下的动态调节, 展现了高度的适应性和灵活性. 蝾螈研究进一步表明, 位于中脑的运动调控区通过改变刺激强度可实现步态切换, 且步态频率与刺激强度呈正相关, 这一机制在多类脊椎动物中普遍存在<sup>[35]</sup>. 这些生物学发现为仿生两栖机器人控制提供了重要启发: 通过仿照分布式 CPG 架构, 可在机器人中实现简洁而稳定的节律生成机制, 同时结合“虚拟 MLR”式的调控策略实现步态切换与多模态控制; 再结合传感反馈调节, 则能够模拟两栖动物在不同介质和环境条件下的运动灵活性与鲁棒性, 从而为多环境适应型机器人提供神经控制学参考.

### 1.3 生物与两栖机器人的双向启发

#### 1) 从生物启发到普适仿生

自然界中的两栖动物经漫长演化形成了兼顾水陆环境的运动模式. 它们往往具有散开式的躯体构型和灵活的肢体协调能力, 有利于横向摆动的体轴运动和陆地四足行走. 例如, 蝾螈、蜥蜴和鳄鱼等动物在水中能通过波动游动, 在陆地上则以四肢爬行或散开式步行的方式移动. 机器人学研究致力于从上述动物的运动机制中汲取灵感, 设计出既能游泳又能行走的两栖机器人. 这些动物对两栖机器人设计的启发主要体现在: 通过生物体的运动方式和结构特征, 指导机器人构型选择、关节分布和控制策略, 从而提高机器人在复杂水陆环境中的适应能力和运动效率<sup>[36]</sup>.

蝾螈、蜥蜴和鳄鱼等水陆两栖爬行动物的运动特征为两栖机器人设计提供了重要启示. 蝾螈体细长、低质心, 四肢宽展、尾部发达, 水中通过躯干和尾部横向波动推进, 陆地采用交替支撑的四足步态,

其神经系统可调控游泳与行走模式. 蜥蜴四肢外伸、躯干低位, 步态随速度从驻波切换为传播波, 并在特殊介质中利用躯干和尾部实现平衡与推进<sup>[37]</sup>. 鳄鱼长躯干、发达尾部, 通过弯曲身体来延长步幅, 通过摇尾巴来保持平衡<sup>[38]</sup>.

除了单一物种对机器人的启发, Li 等<sup>[39]</sup>提出“生物普适启发机器人 (biouniversal-inspired robotics)”的新理念. 该范式强调跨物种、跨类群提炼普适设计规律, 通过识别不同演化支系的趋同适应现象, 形成可扩展、可迁移的机器人设计原则. 趋同演化在自然界广泛存在: 不同谱系的鱼类、翼龙、鸟类和蝙蝠独立演化出符合空气动力学规律的翅膀; 企鹅、鲸类和鱼龙等水生脊椎动物分别演化出相似的鳍肢; 七鳃鳗、吸盘鱼及多种水生昆虫幼体则通过不同解剖途径实现高效吸附. 这些功能收敛体现了环境选择压力与遗传约束共同塑造的适应轨迹, 为机器人设计提供了超越物种特异性的优化思路. 借助机器人平台与仿真工具, 将这些跨谱系功能共性提炼为设计规范, 有望构建面向多任务、多环境的“通用仿生”框架, 实现从生物多样性到工程多样性的有效转化.

综上所述, 这些生物运动模式和结构特征为两栖机器人的具体设计提供了重要参考. 在结构上, 研究者借鉴动物的长脊柱和灵活尾部, 设计多节关节的躯干以及折叠式或伸缩式肢体, 以在不同介质中获得高效推进. 例如, 模仿蝾螈的设计通常采用低质心和宽支撑面的布局以提高行走稳定性<sup>[40]</sup>. 在控制策略方面, 则普遍应用生物启发的 CPG 网络和耦合机制, 通过相位耦合与感知反馈实现肢体与躯干的协调控制. 这些仿生设计使得两栖机器人能够继承生物体在水陆过渡环境中的运动优势, 在复杂地形中展现出良好的机动性和稳定性<sup>[35]</sup>. 通过将生物学观察转化为机器人结构配置和控制算法, 如图 10<sup>[41]</sup>所示, 机器人研究者得以开发出兼具多模态运动能力的先进两栖机器人, 实现了生物启发向工程实现的有效跨越.

#### 2) 机器人反哺生物学

仿生机器人不仅是工程产品, 更是科学实验的“物理化模型”. 机器人被设计用于研究不寻常的生物运动方式, 例如仿生蛇怪蜥蜴在水面上奔跑研制的水上跑步机器人<sup>[42]</sup>和复制鲨鱼蜥蜴在沙子中游泳而设计的蛇形游泳机器人<sup>[43]</sup>. 同样, Salamandra robotica I 机器人<sup>[35]</sup>被设计用于测试有关脊髓运动网络组织的假设, 特别是从游泳到行走的步态转变机制.

如图 11<sup>[41]</sup>所示, OroBOT 是仿生机器人用于古生物运动重建的代表性实例之一: 研究者将 3 亿

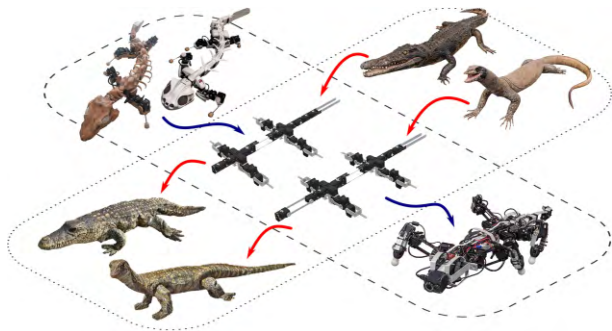


图 10 生物对仿生机器人实现的启发<sup>[41]</sup>, 经许可转载自文献 [41], ©AAAS, 2023

Fig.10 Biological inspiration for the implementation of bionic robots<sup>[41]</sup>, reproduced with permission from reference [41], ©AAAS, 2023

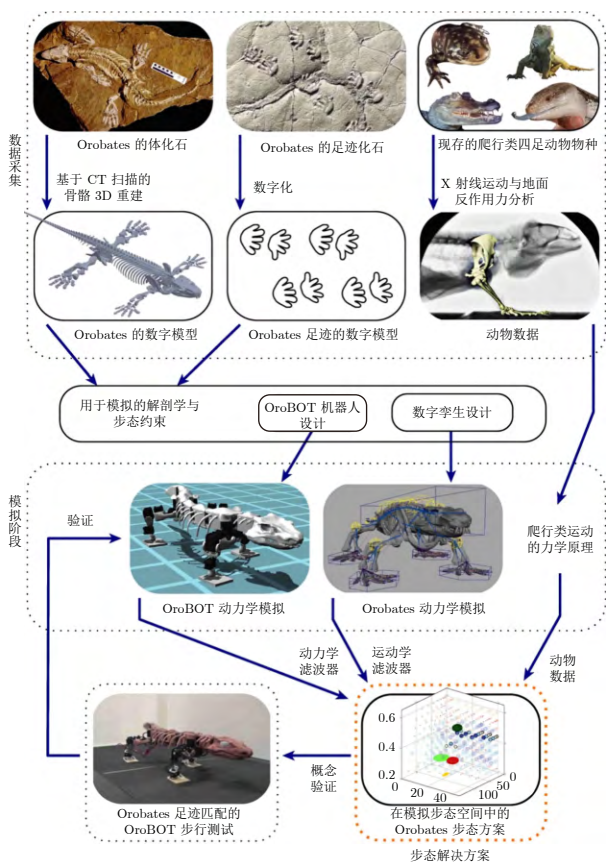


图 11 基于机器人技术的古动物化石运动方式重建流程<sup>[41]</sup>, 经许可转载自文献 [41], ©AAAS, 2023

Fig.11 Workflow for reconstructing locomotion of extinct animals based on robotic technology<sup>[41]</sup>, reproduced with permission from reference [41], ©AAAS, 2023

年前的 *Orobates pabsti* 化石形态转化为仿生机器人, 并结合运动学、动力学和实体实验, 重建其可能的步态. 通过将化石骨架的三维 CT 重建、与其对

应的足迹数据以及现代四足类动物的运动学参数相结合, 研究者建立了一个跨越古生物学与机器人学的综合性实验平台. 结果显示, *Orobates* 很可能采用比此前假设更高的身体姿态, 其行走模式接近现代鳄类等爬行类的步态. 这一推断不仅依赖化石与足迹证据, 更源于机器人实验在多个维度的量化评估: 例如, 测试了不同步态下的机械能消耗效率、整体姿态稳定性以及肢体与地面的接触力学特征, 进而筛选出最符合生物学合理性的步态组合<sup>[36]</sup>. 更重要的是, 这一研究展示了仿生机器人在古生物学中的独特价值. 传统化石分析往往仅停留在静态形态学的推断, 而 OroBOT 的引入使得研究能够在动态层面上验证假说, 探索生物在进化早期如何实现高效而稳定的陆地运动. 这不仅加深了我们对 *Orobates* 生活方式与生态位的理解, 也为解释从早期两栖类向羊膜动物的演化过渡提供了坚实的实验依据<sup>[1]</sup>.

生物学启发到机器人实现, 再利用机器人作为生物学研究平台, 这种闭环研究体现了方法论的统一. 生物学描述形态、神经与力学机制, 机器人则将这些转译为结构、控制与性能指标, 通过跨学科对照验证生物演化的合理性, 如蝶螈步态接近效率最优. 机器人作为“假说验证者”, 通过调控参数 (如介质密度、地形摩擦) 系统扫描效率-稳定性空间, 解释生物步态选择, 促进神经科学、生物力学与进化生物学的融合.

## 2 仿生两栖机器人的推进机理与设计实现

在第 1 节中, 我们分析了多种两栖生物在水、陆介质中的运动特征与生物学机理. 这些运动模式不仅体现了生物在长期进化中形成的高度适应性, 也为仿生两栖机器人设计提供了重要的启发. 在实际的机器人研发中, 推进方式的选择直接影响跨介质运动的可行性、能效和机动性. 根据生物启发的主要运动形态, 现有仿生两栖机器人在推进单元设计上可大致分为鳍推进、肢体推进、连续体波推进以及混合推进等几类. 本节将依次介绍各类推进机理的基本原理、仿生实现方式与典型代表, 并对其性能特点进行分析比较.

### 2.1 鳍推进

鳍推进是水生动物最重要的推进方式之一, 主要分为两种基本形式:

鳍波动推进是许多软骨鱼类、硬骨鱼类及部分无脊椎水生动物的主要运动方式, 其通过在长鳍或

对鳍上产生连续的波动, 实现流体推力的产生. 波动沿着鳍的纵向传播, 形成推进波, 典型形式包括背腹鳍波动 (如翻车鱼)、胸鳍波动 (如蝠鲼、鳐鱼) 及臀鳍波动. 鳍桨式推进依靠鳍的周期性拍击和划动产生推力, 类似于船桨的作用机制. 典型代表包括海龟、企鹅、海狮等, 其推进力主要来自鳍向后下方的强力划水动作, 而回划阶段通过调整鳍的攻角和形态来减小阻力.

在鳍推进类两栖机器人研究中, 已有多种基于不同仿生思路的实现路径. FESTO 公司研制的 Velox 机器人采用高效的仿生鳍推进结构, 研制的仿生鳐鱼 (见图 12(a) 仿生鳐鱼机器人 Velox) 能够在沙地、雪地、鹅卵石、沥青路面及冰面等多种复杂地形中自由移动, 验证了鳍推进在跨介质运动中的适应性, 但该样机在陆地刚性地面上的运动速度与灵活性仍有待提升. Wang 等<sup>[44]</sup> 提出的仿生鱼类两栖机器人 AmphiRobot II, 如图 12(b)<sup>[44]</sup> 所示. AmphiRobot II 综合了鱼类游动与轮-桨-鳍的混合推进机制, 利用旋转切换装置实现水中高速游动与陆地灵活轮式运动的无缝切换, 并在形态优化、浮力计算和防水密封等方面进行了系统设计验证. 相比之下, Asada 等<sup>[45]</sup> 针对传统鳍推进机器人在海底探测能力不足的问题, 研发了一种具备水下步行功能的仿生蝠鲼两栖机器人, 如图 12(c)<sup>[45]</sup> 所示. 该机器人通过将左右胸鳍分段形成六个鳍足, 在保留胸鳍波动游动效率的同时, 实现了低能耗的水下步行能力. 这些研究不仅体现了鳍推进在水陆 (或水底) 多模态运动中的多样化发展路径, 也揭示了将鳍推进与其他推进机制融合以提升环境适应性的趋势.

在鳍推进类的两种基本形式中, 鳍桨式推进以鳍的周期性划水作为主要动力来源, 典型代表是仿

生海龟机器人. 此类设计多利用海龟强劲的前鳍拍击来在水中产生高效推进力, 同时依靠鳍的结构转换实现陆地步行. Shi 等<sup>[46]</sup> 提出了一种“母子”机器人系统, 如图 12(d) 所示的仿生海龟两栖母机器人<sup>[46]</sup>. 母机器人采用仿生海龟形态, 具备球形主体与四条双自由度鳍足, 并由矢量喷水推进器与舵机驱动, 能够在陆地行走及水下巡航, 兼具多功能性与良好的运动性能. Han 等<sup>[47]</sup> 设计的 MiniTurtle-I (见图 12(e) MiniTurtle-I 仿生海龟机器人<sup>[47]</sup>) 则引入了可变拓扑“鳍足”结构, 通过关节冗余实现形态转换, 使其能够在陆地、水中及半水半陆环境中切换不同步态, 显著提高了环境适应性. Baines 等<sup>[48]</sup> 则提出了“自适应形态发生”的概念, 将刚性部件与柔性材料结合, 如图 12(f) 所示的自适应仿生两栖海龟<sup>[48]</sup>, 赋予仿生两栖海龟机器人 (amphibious robotic turtle, ART) 在多环境间通过肢体形态与步态的协同变化实现高效运动的能力.

## 2.2 刚性肢体推进

在肢体爬行类仿生两栖机器人中, 螃蟹和青蛙因其多样化的步态与跨介质适应能力, 成为代表性的仿生原型. 螃蟹类机器人依托多足步行在水下和复杂地形中表现出卓越的稳定性与机动性. 已知世界上第一款仿生两栖机器人为美国 Greiner 等<sup>[4]</sup> 研制的自主水下腿式仿生螃蟹机器人 (见图 13(a)<sup>[4]</sup>), 其仿生对象为螃蟹, 最初用于海滩破障与扫雷任务. 该系列机器人在第一阶段的“Ursula”平台中验证了水下步行与水雷探测的可行性, 第二阶段则进一步优化了水下行走速度、效率及探测性能, 能够以低成本、大规模部署的方式在海浪拍打的浅水区独立作业. 韩国研发的 Crabster (CR200) 同样是一种六

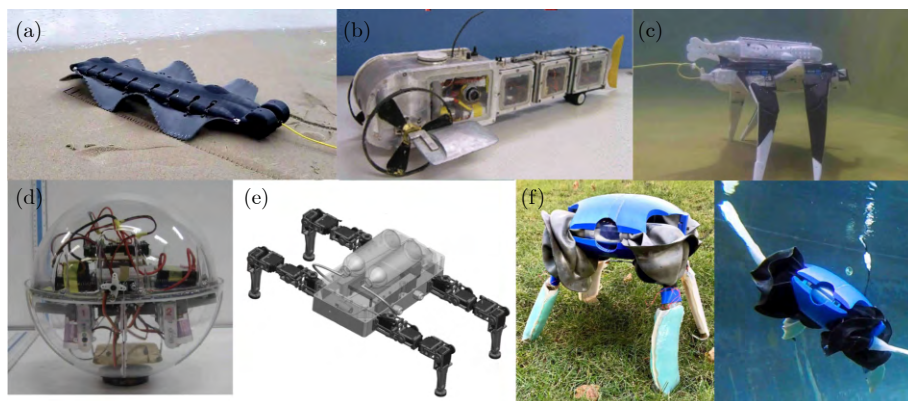


图 12 鳍推进类仿生两栖机器人<sup>[44-48]</sup>, 经许可转载自文献 [44-48], ©IEEE, 2009; ©Elsevier BV, 2024; ©Springer, 2017; ©Taylor & Francis Ltd., 2015; ©Springer Nature, 2017

Fig. 12 Fin-propelled bionic amphibious robots<sup>[44-48]</sup>, reproduced with permission from reference [44-48], ©IEEE, 2009; ©Elsevier BV, 2024; ©Springer, 2017; ©Taylor & Francis Ltd., 2015; ©Springer Nature, 2017

足仿生螃蟹机器人(见图 13(b))<sup>[49]</sup>, 面向强流和浑浊水域的海洋探测任务, 研究者设计并验证了能够实现静态步行与游泳的切换算法, 提出一种基于调度向量与成对足索引向量的算法设计方法, 可通过不同组合实现六种步态与四种游泳模式, 并在 MATLAB 仿真与实物实验中验证了其在多种海底作业环境下的适应性. Wang 等<sup>[50]</sup>设计一种面向浅滩环境的腿-桨混合驱动仿生螃蟹机器人(见图 13(c))<sup>[50]</sup>, 其采用六个三自由度步行腿在海底行走, 并配备两个三自由度的游泳桨实现水中推进. 研究团队提出了模仿生物螃蟹在捕食或受袭时的“跃行步态”, 通过步态过程规划、运动学建模、轨迹设计及水动力分析, 使平均速度相比仿生波浪步态提高了 54%, 显著提升了能效与机动性. 这些研究表明, 仿生螃蟹机器人在水下步行、跨介质切换及复杂流场适应方面具备独特优势, 为未来高机动性的两栖作业平台提供了重要参考.

与螃蟹类似, 青蛙类机器人同样展现出跨介质推进的优势, 但在驱动与机构设计上更注重仿生游泳动作的再现. FroBot 是一种采用“双摆腿”推进机构的新型两栖机器人(见图 13(d))<sup>[51]</sup>, 其灵感来源于青蛙的滑行机制与蛙泳姿态<sup>[51]</sup>. 该机器人在陆地利用配套的万向轮结构获得推进力, 而在水下则通过一对尾鳍模拟青蛙蹼足产生推力. 由新加坡国立大学和南京理工大学合作构建的仿生青蛙游泳机器人<sup>[52]</sup>则聚焦于介电弹性体驱动器(dielectric elastomer actuators, DEAs). 该驱动器具备类肌肉特性, 如大变形、高能量密度、响应快且重量轻. 受青蛙蹼足启发, 机器人的足部驱动器在高电压作用下可将投影面积增加 66%, 从而提升平均峰值推力 34.5%, 且两只 DEAs 的总质量仅为 14 g. 此外, 气动人工肌肉因其与生物肌肉相似的特性, 也被引入仿生青蛙机器人的设计中<sup>[53]</sup>, 如图 13(e) 所示的 DE 驱动仿生青蛙机器人<sup>[52]</sup>. 哈尔滨工程大学的研究者基于青蛙的游泳机制, 构建了一种内置气动腔室、微型气泵与电磁阀的气动系统(见图 13(f)) 气动人工肌肉仿生青蛙机器人<sup>[53]</sup>, 以实现独立任务驱动. 系统利用高速开关阀降低了成本、体积与质量, 并建立了包含气腔、肌肉及气路的动态模型. 这些研究表明, 仿生青蛙机器人在推进机构创新、轻量化驱动与跨介质运动控制方面具备显著潜力, 为开发高机动性、多模式切换的两栖机器人提供了重要技术参考.

龙虾和螳螂等节肢动物同样为两栖机器人设计提供了重要仿生灵感. 仿生龙虾机器人以八条三自由度步行腿为核心(见图 13(g)) SMA 驱动仿生龙虾机器人), 采用 SMA 驱动<sup>[54]</sup>, 并引入源自龙虾的行为模式库与类神经形态传感器, 但其控制器设计

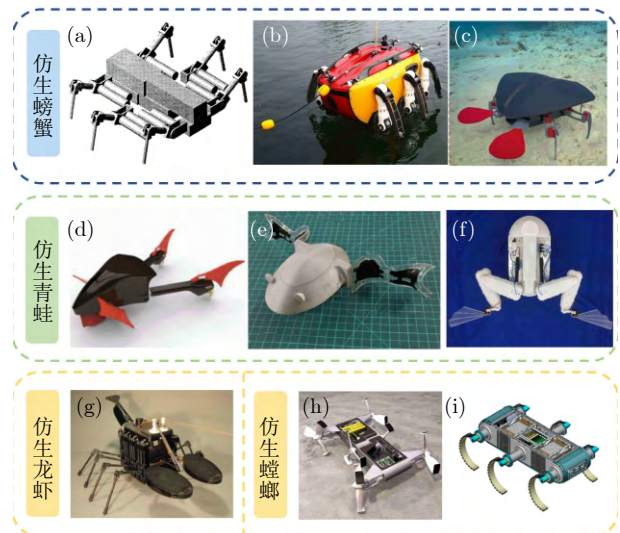


图 13 刚体推进类两栖机器人<sup>[4, 49-53, 55-56]</sup>, 经许可转载自文献 [4, 49-53, 55-56], ©IEEE, 1996; ©Marine Technology Society, 2016; ©Elsevier, 2017; ©IEEE, 2015; ©IEEE, 2017; ©Springer, 2017; ©IEEE, 2005; ©IEEE, 2012

Fig. 13 Rigid-body propulsion amphibious robots<sup>[4, 49-53, 55-56]</sup>, reproduced with permission from reference [4, 49-53, 55-56], ©IEEE, 1996; ©Marine Technology Society, 2016; ©Elsevier, 2017; ©IEEE, 2015; ©IEEE, 2017; ©Springer, 2017; ©IEEE, 2005; ©IEEE, 2012

较为复杂. 仿生螳螂机器人则更多借鉴了昆虫类六足步行系统的结构与控制原理. 六足机器人通过多种步态及其动态切换, 实现了在不平整地面上的高稳定性, 同时兼具陆地行走、海底爬行、水面游动及水下航行的跨介质机动能力. 例如, 基于 Whegstrade 平台的自主式两栖机器人(见图 13(h))<sup>[55]</sup>引入了轮-足复合推进器以支持游泳, 配合主动顺应、防回驱的密封关节及改进型足部结构, 使其在崎岖陆地与水下均具备高机动性, 并能以较低控制复杂度完成多样化任务<sup>[55]</sup>. 另一典型设计 AmphiHex-I(见图 13(i)) AmphiHex 仿生螳螂两栖机器人<sup>[56]</sup>则采用可变形腿-鳍复合推进机构, 通过椭圆形腿与环境(包括泥沙及不同含水率的颗粒介质)相互作用实现跨介质运动; 实验验证了其在陆地与水下均具备稳定推进能力<sup>[56]</sup>. 这些基于龙虾与昆虫节肢类的机器人在多自由度腿式驱动、跨介质切换及环境适应性方面展现了显著优势, 为未来高通用性两栖平台提供了坚实的技术基础.

### 2.3 柔性肢体推进

第 2.2 节详细介绍了刚体推进类的主要代表性

两栖机器人, 然而肢体推进并非仅限于刚性关节结构, 也可以通过柔软的附肢实现. 材料所具备的柔顺性、连续变形能力、可拉伸性、不可压缩性、流体动力学优势, 以及对损伤与恶劣环境的适应性, 使其成为实现两栖机器人跨介质高效运动的理想选择. 近年来, 受章鱼、椰子章鱼、海胆以及海星等生物启发的“柔性肢体推进”逐渐受到关注. 这类机器人通常依靠柔顺且高度冗余的软体附肢, 通过抓附与步态协调来完成运动, 展现出对复杂环境的高度适应性. 部分原型主要在水底实现贴底爬行, 这种“底栖推进”因此也可视为一种特殊的“两栖推进”, 因为其运动机制具备向陆地环境拓展的潜力.

在柔性肢体推进类机器人中, 章鱼因其极高的柔顺性与多样化的运动策略而成为最具代表性的原型之一. Arienti 等<sup>[57]</sup>的相关研究展现了从概念设计到功能验证的多层次探索. 例如, 2013 年, 他们提出了首个几乎完全由软材料构成的仿生水下章鱼机器人 PoseiDRONE (见图 14(a)<sup>[57]</sup>), 其主体约 80% 由橡胶状材料组成, 在单一连续体结构中实现了底栖爬行、操控与游动三种功能的集成, 展示了面向海洋作业的颠覆性潜力. 2015 年, 他们则聚焦于水下足式运动的动力学机理, 通过仿生章鱼原型揭示了地面反作用力与肢体划桨运动共同作用的推进机理<sup>[58]</sup>, 并通过调整浮力中心与质心的位置, 成功实现了不同速度与方向的多样化运动方式 (见图 14(b)水动力学仿生章鱼机器人<sup>[58]</sup>). 同年研究者们还设计了一种八腕完全软体的 OCTOPUS 机器人, 如图 14(c)<sup>[59]</sup>所示. 其中央体内嵌控制单元, 前臂负责伸展与抓取, 其余腕足主要用于推进<sup>[59]</sup>. 受椰子章鱼 (coconut octopus) 启发的水下双足软体机器人 (见图 14(d)<sup>[60]</sup>) 同样具有独特的仿生学意义. Wu 等<sup>[60]</sup>基于其在水下利用腕足滚动实现双足行走的策略, 提出了一种基于弹簧加载倒立摆模型的水下双足运动方法. 该设计采用钢索驱动方式构建柔性腕臂, 使其具备在水底进行滚动和支撑的能力, 并建立了相应的 SLIP 步行模型, 从而提高机器人在复杂和不平整地形中的适应性. 实验表明, 该机器人不仅能够不同底质上实现贴底行走, 还能在复杂环境中保持良好的适应性, 并具备对多种形状物体的抓取能力. 整体来看, 受章鱼启发的这些柔性肢体机器人充分展示了软体附肢在水下环境中集成推进、操控与环境适应的独特优势, 同时也为未来跨介质运动与多任务水下操作平台的研发提供了重要启示.

海胆依靠刚性的棘刺与柔性的管足协同作用, 能够在复杂环境中稳定移动. 受此启发, 哈佛大学的研究者们开发了一种软体流体驱动的仿生海胆机

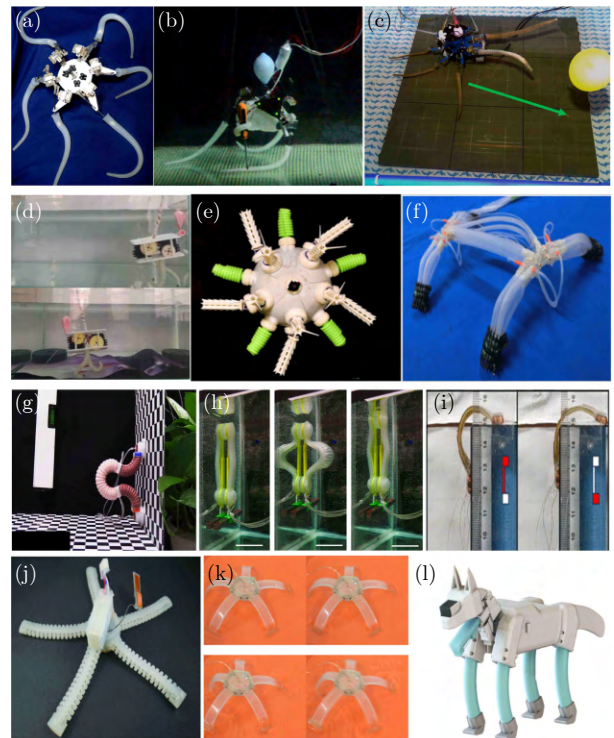


图 14 柔性肢体推进两栖机器人<sup>[6, 57-67]</sup>, 经许可转载自文献 [6, 57-67], ©IOP Publishing, 2016; ©IEEE, 2013; ©IOP Publishing, 2015; ©IOP Publishing, 2015; ©IOP Publishing, 2021; ©IEEE, 2019; ©IEEE, 2017; ©IEEE, 2021; ©Mary Ann Liebert, Inc., 2018; ©IEEE, 2023; ©IEEE, 2020; ©IOP Publishing, 2019

Fig. 14 Flexible limb-propelled amphibious robots<sup>[6, 57-67]</sup>, reproduced with permission from reference [6, 57-67], ©IOP Publishing, 2016; ©IEEE, 2013; ©IOP Publishing, 2015; ©IOP Publishing, 2015; ©IOP Publishing, 2021; ©IEEE, 2019; ©IEEE, 2017; ©IEEE, 2021; ©Mary Ann Liebert, Inc., 2018; ©IEEE, 2023; ©IEEE, 2020; ©IOP Publishing, 2019

器, 如图 14(e)<sup>[61]</sup>所示. 设计包含五个柔性管足与十个刚性棘刺的主体结构, 每一附肢均可通过软体三角架驱动器实现独立驱动<sup>[61]</sup>. 为了提升抓附能力, 柔性管足末端还集成了永久磁体, 使机器人能够在铁磁表面自由移动, 并能展现与生物体相似的步态与防御姿态.

如图 14(f)<sup>[62]</sup>所示, 软仿生蜥蜴机器人采用直径 4 mm 的细软 McKibben 气动驱动器构建四足与身体弯曲机构, 每条腿由三个连杆平行排列, 身体部分则由四个驱动器通过薄塑料板并联连接<sup>[62]</sup>. 驱动器引起的塑料板弹性变形可辅助实现类似蜥蜴的左右摆动步态. 该机器人能在平地与 10° 斜面上以 trot 步态的速度可达 0.056 m/s, 并能以 crawl 步态在沙地与水中分别以 0.041 m/s 和 0.022 m/s 速度稳定移动.

尺蠖同样是备受关注的经典仿生对象<sup>[63]</sup>. 如图 14(g)<sup>[63]</sup> 所示的仿生尺蠖机器人在水平面上的最高速度可达 21 mm/s, 在垂直墙面上的速度为 15 mm/s, 并能在狭窄空间内携带约 500 g (自身重量的 15 倍) 的负载<sup>[63]</sup>. 此外, Tang 等<sup>[64]</sup> 开发了一种基于新型气动黏附执行器的两栖攀爬软体机器人, 该执行器通过充气变形产生稳定负压, 可在干燥、湿润、光滑及半光滑等多种表面实现快速可逆吸附, 所提出的气动两栖软体机器人 (见图 14(h)<sup>[64]</sup>) 可在水下和陆地的垂直表面上负载超过自重 5 倍的物体. 此外, 还有研究提出了一种小型电磁驱动的柔性两栖机器人 (见图 14(i)<sup>[65]</sup>), 其采用液晶弹性体 (聚酰亚胺薄膜) 的不匹配应变结构, 结合电磁吸附爪, 实现了类似尺蠖的步态运动<sup>[65]</sup>. 该机器人仅重 5 g, 能够在小于 30 V 的低驱动电压下完成多姿态运动, 甚至能在复杂地形和倒置状态下稳定爬行. 这些受尺蠖启发的仿生机器人展示了多模态运动在两栖机器人中的巨大应用潜力, 不仅拓展了机器人在不同环境间过渡的能力, 也为未来在检测、维护与探索任务中的应用奠定了基础.

卡内基梅隆大学研究者提出了一款受蛇尾星启发的软体机器人 PATRICK (见图 14(j)<sup>[66]</sup>). 其采用五条柔性肢体, 每条肢体由 20 根形状记忆合金丝驱动<sup>[66]</sup>. 研究者基于运动基元提出了运动规划方法, 并在实验中实现了闭环控制, 使机器人能够在水下自主爬行至目标位置. 该工作是首个实现水下无缆绳、闭环状态空间运动控制的软体爬行机器人, 向软体水下机器人的完全自主化迈出了重要一步.

仿生海星机器人 (见图 14(k)<sup>[6]</sup>) 则以海星多腕拓扑为原型, 其腕部由软性复合材料制成的智能模块结构构成, 利用 SMA 丝驱动产生平面往复运动<sup>[6]</sup>. 通过基于电阻变化的自适应调温策略, 可有效避免 SMA 过热、调控弯曲幅度并提升响应速度. 实验表明, 该五腕机器人在半浸水与水下环境均能高效推进. 另一方面, 仿生犬类机器人参考真实犬类划水运动的运动学与流体动力学特征, Li 等<sup>[67]</sup> 利用水下录像分析四足划水步态, 并采用四个预充气软驱动器构建原型模型进行仿真, 验证了其在水密性、防锈性与水动力效率方面的潜力, 为未来仿生两栖犬机器人 (见图 14(l)<sup>[67]</sup>) 设计提供了有价值的参考.

## 2.4 连续体波推进

连续体波推进类两栖机器人以模仿蛇类或鳗鲡等细长体动物在水、陆两种介质中的波状运动为核心. 具备跨水陆两栖的体波推进机器人相对较少, 但已有的代表性研究展现了该类机器人在跨介质运

动中的独特优势.

其中, AmphiRobot I 与 II 是典型的仿生蛇/鳗鲡机器人 (见图 15(a)<sup>[68]</sup>). 其控制架构基于源自七鳃鳗脊髓神经回路的 CPG 模型, 由一组耦合的非线性振荡器组成, 可在机器人上实时生成协调的行波, 并允许操作者交互式调节. 该模型具有极限环特性, 能够产生对扰动鲁棒的稳定节律波形, 并通过解析解实现对波频率、振幅、波长等关键参数的精确控制, 从而在水中与陆地上均能平稳调整运动速度与方向<sup>[68]</sup>. NASA 喷气推进实验室提出的 EELS (exo-biology extant life surveyor), 则面向极端外星环境探索任务<sup>[69]</sup>, 用于在土卫二等冰卫星的极端表面环境中移动, 并沿喷发裂隙下降以采集未经改性的液态样本. EELS 采用高度自治的蛇形结构, 能够在地形几何和物理特性高度不确定、通信受限的条件下进行风险感知、任务与运动规划, 并在野外与仿真

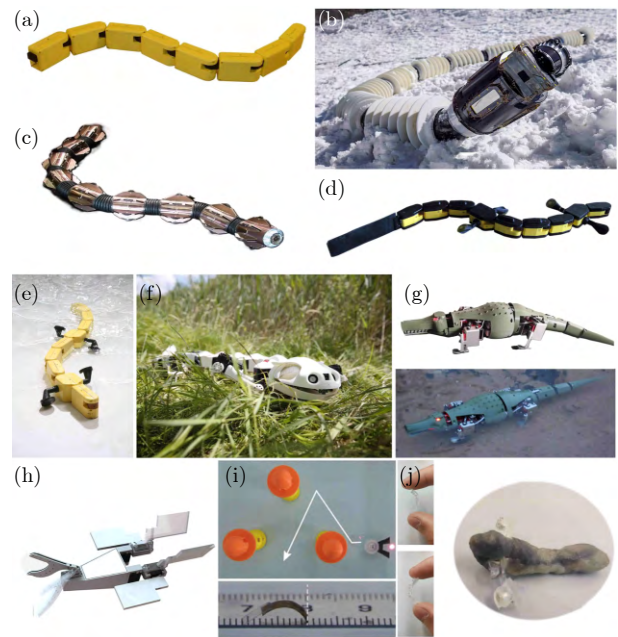


图 15 连续体波推进与混合推进两栖机器人<sup>[28, 35, 40, 68-73]</sup>, 经许可转载自文献 [28, 35, 40, 68-73], ©Mary Ann Liebert, Inc., 2024; ©AAAS, 2007; ©The Royal Society, 2016; ©IEEE, 2007; ©AAAS, 2024; ©IEEE, 2013; ©John Wiley & Sons Inc., 2017; ©Elsevier, 2023; ©American Chemical Society, 2022

Fig. 15 Continuous body wave propulsion and hybrid propulsion amphibious robots<sup>[28, 35, 40, 68-73]</sup>, reproduced with permission from reference [28, 35, 40, 68-73], ©Mary Ann Liebert, Inc., 2024; ©AAAS, 2007; ©The Royal Society, 2016; ©IEEE, 2007; ©AAAS, 2024; ©IEEE, 2013; ©John Wiley & Sons Inc., 2017; ©Elsevier, 2023; ©American Chemical Society, 2022

测试中展现出在冰面与裂隙环境下的稳定推进与感知能力(见图 15(b)) 极端环境探测仿蛇机器人<sup>[69]</sup>。这些研究显示出其在极端与未知环境探索中的巨大潜力, 为未来两栖及外星探测机器人设计提供了重要参考。而日本东京工业大学与 HiBot 公司研发的 ACM-R5 机器人(见图 15(c)) 进一步优化了模块化蛇形机器人的机械与驱动系统, 使其具备在复杂地形及水中灵活推进的能力, 并在跨介质环境下表现出较高的机动性与适应性<sup>[74]</sup>。

## 2.5 混合推进

混合推进机制是指两栖动物在不同介质中采用不同的运动模式: 在水中依靠身体波动(如摆尾)产生推力, 而在陆地上则以肢体运动实现推进。这种模式在生物进化史中具有重要意义, 例如蝾螈在水中展现出典型的鳗形游动, 而在陆地上则使用四肢爬行步态。仿生学研究通过复制这种跨介质运动模式, 不仅推动了机器人运动控制技术的发展, 还为神经控制机制、肢体-身体协调模式等领域提供了重要的实验平台。

Ijspeert 等<sup>[35]</sup> 先后研制了多代具有里程碑意义的仿生蝾螈机器人, 系统探索了从水生到陆生运动的神经与机械机理。第一代 *Salamandra robotica I* 机器人(见图 15(e)<sup>[35]</sup>) 基于脊髓中央模式发生器(CPG)模型, 将水生脊索动物的游动神经回路与四足动物的肢体振荡中枢结合, 实现了机器人在游泳与行走模式间的切换。该模型揭示了身体波动中心和肢体振荡中心之间的频率差异。

在此基础上, 第二代 *Salamandra robotica II* 机器人(见图 15(d)<sup>[70]</sup>) 对硬件进行了显著改进<sup>[70]</sup>, 包括四肢驱动与可控脊柱相结合, 使其在水中能够进行高效的鳗形游动, 在陆地上实现更稳定的步态。该代机器人重点研究了体-肢协调参数(如波形偏移、振幅、相位滞后等)对速度和转弯曲率的影响, 并与真实蝾螈运动数据进行对比, 发现二者在步态节律与肢体、身体运动时序上高度一致。

Pleurobot 是基于前两代研究成果演进而来的新一代仿生平台, 尽管其未沿用 *Salamandra robotica III* 的命名, 但在研究目标与技术路线上的延续性很强。它采用高速 X 射线运动捕捉、优化设计、动态缩放、3D 打印、高端伺服驱动以及定制防水外套等方法, 构建出高度仿生的水陆仿生两栖蝾螈机器人(见图 15(f)<sup>[40]</sup>)。该机器人拥有 27 个主动自由度, 能捕捉并重现动物大部分关节的运动范围。实验表明, 其在水中与陆地上的运动速度、身体横向位移及地面反作用力均与真实动物高度匹配, 为研

究更复杂的运动技能提供了强有力的工具。

总体而言, 这三代仿生蝾螈机器人形成了从基础神经控制模型验证(*Salamandra robotica I*)、到硬件性能与运动协调优化(*Salamandra robotica II*)、再到高自由度、高仿生物力学平台(Pleurobot)的清晰技术发展脉络, 不仅揭示了混合推进机制的生物学机理, 也为未来多环境、多模式运动机器人设计提供了系统的理论与实验支撑。

类似地, 仿生鳄鱼机器人(见图 15(g)<sup>[71]</sup>) 通过模仿鳄鱼在水中摆尾和陆地爬行的混合推进, 实现了多环境适应。深圳大学以“死亡翻滚”为设计灵感的多自由度机器人<sup>[71]</sup>, 尾部采用四段摆动结构, 在单电机驱动下实现高效摆尾运动; 腿部基于双平行四边形机构, 可完成爬行和收缩动作; 嘴部采用双摇杆机构, 实现高效闭合与锁定; 主体则采用上下分段结构并具备防水功能。另一款鳄鱼仿生机器人则进一步结合了软体执行器与刚柔耦合设计, 通过协调腿部、躯干和主动尾部的多执行器运动, 实现腹爬、高位行走、疾行、转向及游泳等多模式运动。其中, 躯干采用波纹管柔性结构, 能够与腿部驱动协同产生弯曲和摆动, 提高柔顺性与机动性; 尾部同样采用软性气动网格结构, 实现主动控制的摆动推进。

仿生弹涂鱼机器人主要借鉴了弹涂鱼在水陆过渡环境中的独特运动策略。弹涂鱼能够在水中依靠鱼鳍划动实现高效推进, 在陆地上则通过胸鳍与尾鳍的协同完成步行与转向, 这一混合推进模式为两栖机器人设计提供了重要的生物学启发。基于此, 厦门大学研制了仿生两栖弹涂鱼机器人(见图 15(h)<sup>[72]</sup>), 通过胸鳍与尾鳍的协调驱动显著提升了推进效率与机动性能, 使其在陆地与水中的转向速度分别提高约 50.1% 和 24.4%。在传统驱动之外, Xiang 等<sup>[73]</sup> 还探索了光驱动与磁驱动的柔性方案, 他们开发了一种光驱动弹涂鱼仿生执行器(见图 15(i)<sup>[73]</sup>), 其由多孔硅橡胶与氧化石墨烯构成, 能够对近红外光产生快速可逆的收缩响应, 从而实现空气中弯曲、液体中爬行及液-气界面的浮动游动, 并可在 400 ms 内完成水面跃出, 最高速度达 2 m/s、跳跃高度达 14.3 cm。与此同时, Ning 等<sup>[28]</sup> 提出了基于磁控与软体黏液材料的微型弹涂鱼磁控软体机器人(见图 15(j)<sup>[28]</sup>)。该机器人仅指尖大小, 通过单一旋转外磁场即可在陆地上模拟弹涂鱼的步态, 其胸鳍采用单行空间织物结构 3D 打印而成, 可实现类似划桨的运动方式, 具备可预测的步幅特性, 为柔性软体机器人的运动建模与控制提供了新的思路。总体来看, 这三类设计分别展示了通过结构优化、光驱动和磁控技术实现水陆两栖混合推进的多样化策略。

## 2.6 跨介质运动下推进方式的适应性变化与效能表现

在两栖运动中, 不同推进方式在各介质及其边界的表现差异显著, 其优势与局限源自介质物理属性的差异, 以及驱动机理与环境相互作用耦合的不同. 一般而言, 水中依靠流体反作用力的体波与鳍推进可产生连续推力、效率较高; 陆地或硬质基底环境中, 肢体式驱动依托明确接触支撑与摩擦约束, 更利于姿态稳定. 然而, 当跨越水陆或水-沉积物边界时, 浮力、阻力与接触条件突变使单一推进机制难以兼顾效率与稳定性, 整体推进效能下降.

针对刚性肢体构型的两栖机器人, 多项定量研究系统揭示了鳍推进与肢体推进在水、陆介质中的性能分化, 以及在介质转换过程中进行驱动模态切换的必要性. 例如, AmphiRobot II 在水下采用鱼泳及海豚泳运动形态, 而在陆地上切换轮鳍进行运动<sup>[44]</sup>. ART 的能效谱系量化了这一差异<sup>[48]</sup>: 在水相巡航时, 利用攻角调整产生流体升力“扑动”模式能效最优 (见图 16(a) ART 水域运动时划水步态与扑动步态受力图<sup>[48]</sup>). 其无量纲移动能耗成本 (cost of transport, COT) 低至约 3; 在硬质陆地, 基于刚性支撑的直立行走模式 COT 维持在 10 到 21 之间. 然而, 在跨越包含流态化沉积物 (如沙地、潮间带) 的介质边界时, 常规直立步态因基底沉陷而失效, 机器人被迫采用高摩擦损耗的“匍匐”步态, 致使 COT 比在陆地上高出 140% (见图 16(b) ART 在陆地基质运动时, 直立爬行步态周期内的运动示意图及过渡性基质运动的爬行步态示意图<sup>[48]</sup>). Liu 等<sup>[75]</sup>研制的仿生两栖海龟 IBATR 进一步指出, 若能根据介质特性主动切换驱动策略, 即在水中采用优化的鳍推进以抑制涡流阻力, 在松软边界采用增大接触面积的对称步态, 相较于单一静态步态, 机器人的整体能耗可降低 19.1%, 移动速度提升 9.2%. 这些结果共同表明, 鳍推进和肢体推进分别在水下与陆地环境中展现出各自的效率优势, 而在介质交界区域实现二者之间的平滑切换, 是保证跨介质运动整体性能的关键.

对于柔性长身躯构型的两栖机器人, 驱动机理的适应性则主要体现为运动波形的转变. 相关研究表明, 为了适应介质物理属性的根本差异, 基于 CPG 的控制系统需要对输出节律进行重构: 在陆地环境中, 躯干运动表现为与肢体步态协同的驻波模式, 以优化步幅并增强静态稳定性; 在水介质中, 驱动模式则切换为沿体轴向后传播的行波形式, 从而有效利用流体动力学作用产生推进力.

在跨介质运动研究中, 除推进步态的切换外,

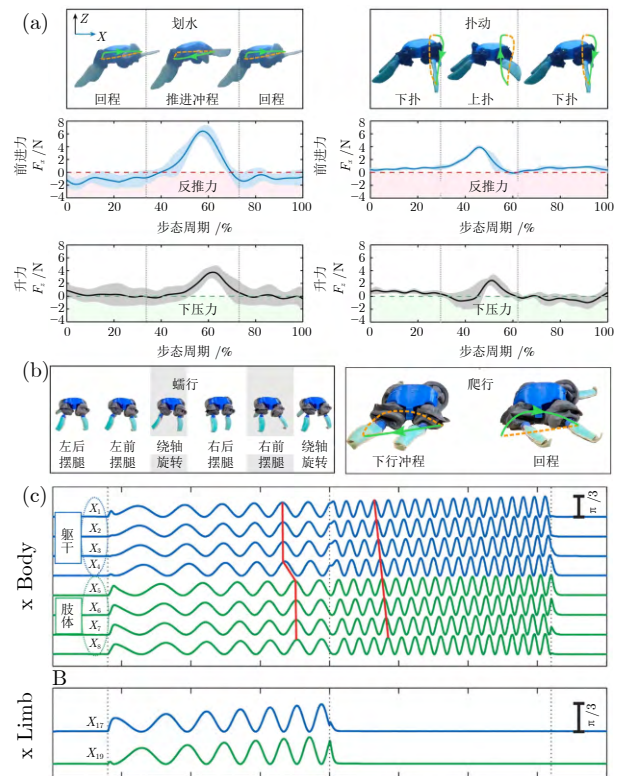


图 16 跨介质运动中推进方式的转换<sup>[35, 48]</sup>, 经许可转载自文献 [35, 48], ©AAAS, 2007; ©Springer Nature, 2022

Fig. 16 Propulsion mode transitions in cross-medium locomotion<sup>[35, 48]</sup>, reproduced with permission from reference [35, 48], ©AAAS, 2007; ©Springer Nature, 2022

驱动信号时空结构的调整同样被认为是影响运动效能的重要因素. 已有研究表明, 当机器人或生物的躯干运动直接参与推进或姿态调节时, 不同介质下所采用的体轴波形在推进效率与稳定性方面存在显著差异. Salamandra robotica I 在陆地等依赖接触支撑与摩擦约束的环境中, 采用以肢体步态为主、躯干呈现驻波特征的驱动模式, 该模式有利于协调前后肢受力分配, 从而提升静态稳定性并避免不必要的侧向滑移; 在水介质中, 驱动策略则切换为沿体轴向后传播的行波模式, 使躯干摆动能够有效激发流体反作用力, 显著提升单位能耗下的推进效率 (见图 16(c) 跨介质运动过程中, 驱动信号逐渐增强时 CPG 信号的变化示意图<sup>[35]</sup>).

跨介质运动中推进方式的效能并不存在单一最优解, 其性能优势高度依赖于介质主导物理机制的差异: 水介质中以流体动力学为主导, 鳍推进与体波推进具有更高能效; 陆地环境中以接触支撑与摩擦约束为主导, 肢体推进更具稳定性优势; 在介质边界区域, 推进效能的维持关键在于驱动模式、步

态结构及控制策略的自适应切换. 这一认识为跨介质机器人的推进系统设计与控制架构提供了明确的物理依据.

### 3 感知能源与控制技术

#### 3.1 感知技术

传感器在仿生两栖机器人中发挥着至关重要的作用. 它们可以通过感知环境信息, 监测机器人的运动状态, 完成路径规划和运动模式切换. 此外, 传感器是实现两栖机器人自主作业的关键基础. 表 1 列出了仿生两栖机器人携带的常见传感器.

在感知外界环境的传感器中, 水探测传感器常被用于判定机器人所处的介质环境, 这类传感器能够在机器人从陆地进入水域时及时触发模式切换, 为自主工作提供可靠保障. 例如, Kashem 等<sup>[76]</sup>研制的鸭脚启发四足两栖机器人采用了此类遇水检测方案, 在真实外场环境中成功实现了从陆地模式到水面推进模式的平滑切换. 除了介质检测外, 人工侧线传感器作为一种仿生传感技术, 模拟了鱼类的侧线器官结构. 该传感器通过感知压差或流场变化来检测水流扰动, 在浑浊的水下环境中能够提供对近场障碍物的感知信息, 弥补了视觉传感器在恶劣环境下的不足. 在实际应用中, Zheng 等<sup>[77]</sup>提出了基于人工侧线的相对状态估计方法, 用于上游摆动鳍与下游仿生鱼之间的协调控制. Luo 等<sup>[78]</sup>将人工侧线阵列与神经网络结合, 用于水下运动目标识别, 验证了侧线在浑水环境下的识别与分类能力.

在外界障碍与地形感知方面, 超声或声呐测距模块能够在水下或水面环境中提供障碍物的方位和距离信息, 适用于近距避障与水下环境建图. Bianchi 等<sup>[79]</sup>研制的水面蛇形机器人和 Li 等<sup>[80]</sup>开发的球形两栖机器人, 评估了多超声传感器的避障性能,

为在波浪与障碍环境中利用声学、超声测距提供了平台与实验依据, 给出了超声阵列布局与策略对避障效果的影响; 同时, 相机系统 (包括单目、双目与 RGB-D) 则承担高分辨率环境感知与目标识别任务, 常用于陆地和水面场景中的路径规划与地形重构, 但在水下需要配合图像增强与畸变校正技术以保证感知质量. Guo 等<sup>[81]</sup>为球形两栖机器人开发视觉检测与跟踪系统, 实现了目标跟踪与视觉伺服, 为陆地与水面场景的导航提供高分辨率感知. Xing 等<sup>[82]</sup>提出 RGB-D 与 IMU 融合的多机器人协同与近程相对定位方案, 提升多台海龟启发球形机器人在近距离任务下的定位鲁棒性. Li 等<sup>[83]</sup>研制了两栖球形机器人, 搭载了红外传感等多种传感器, 实现了对环境距离信息的精确获取与定位.

导航与控制的传感器也有强大的定位功能, 惯性测量单元 IMU 通过加速度和角速度的实时测量实现机器人姿态估计与动态监测, 是实现稳定运动和控制闭环的重要手段. An 等<sup>[84]</sup>针对 SUR-III 球形水下机器人, 研究并评估了姿态与稳定性提升方法, 实测中将 IMU 作为姿态估计与稳定控制的核心反馈源. Liu 等<sup>[85]</sup>构建多传感器融合定位系统, 以 IMU 为高速状态观测核心, 并与其他传感器融合, 改善两栖球形机器人动态定位准确度. 而在宏观定位上, GPS 则提供绝对位置参考, 特别是在陆地或水面环境下, 为路径规划与航向保持提供支持.

在水下作业过程中, 压力或深度传感器能够通过水压测量实现对深度的监控, 既是机器人保持在安全工作范围内的必要条件, 也是实现精确纵向运动控制的重要依据<sup>[85]</sup>. Xing 等<sup>[86]</sup>提出基于卡尔曼滤波的导航系统, 以压力、深度传感器为关键量测, 完成深度估计与平滑控制, 用于保持安全水深与纵向稳定. 同时, 关节或推进系统中的应变传感器可实时监测负载与受力情况, 不仅为步态优化和推进效

表 1 典型传感器及功能  
Table 1 Typical sensors and functions

功能目标	典型传感器	作用	文献
环境识别/介质判断	水探测传感器	判定介质环境并感知流体扰动, 支持模式切换与环境适应	[76]
	人工侧线		[77-78]
外界障碍/地形感知	超声/声呐测距	获取障碍与地形信息, 实现避障与路径规划	[79-80]
	相机/双目/RGB-D		[81-82]
	红外传感器		[83]
定位与航向	IMU	提供姿态与定位信息, 保障多环境下的稳定导航	[84-85]
	GPS		[85]
深度/压力与介质状态	压力/深度传感器	监测水压与深度, 维持水下安全与稳定	[86]
感知与运动调控	霍尔传感器	感知腿部柔顺性, 进而实现地形分类; 控制机器人前进速度	[76, 87]
	接近传感器	实现微型机器人的自主抓取、避障, 辅助在复杂/狭窄空间内的操作与定位	[88-89]

率提升提供反馈, 还可用于检测潜在的结构异常。

在众多传感器中, 霍尔传感器与接近传感器常用于感知与运动调控, 应用广泛。Grezmak 等<sup>[87]</sup> 在螃蟹式两栖机器人上利用低成本霍尔效应磁力仪和嵌入式磁铁测量运行期间的部件偏转来收集地形信息, 从而实现实时地形表征, 并使机器人能够调整步态以更好地适应环境。此外, Li 等<sup>[88]</sup> 设计的仿小龙虾微型机器人通过在前端集成接近传感器实现了自主抓取小型物体, 而另一种龙虾形机器人则利用多接近传感器完成目标检测和避障<sup>[89]</sup>。这些研究表明, 霍尔传感器和接近传感器在提升机器人环境适应性和操作灵活性方面具有重要价值。

与传统机器人依赖相机、声呐等少量刚性传感器获取环境信息的方式不同, 仿生感知强调“结构-功能一体化”的理念, 其核心特征体现在分布式感知、柔顺耦合与多模态融合。自然界中, 鱼类、两栖动物及海洋哺乳动物普遍在体表具有大量简单但高度敏感的感知器官, 如侧线、触须与毛状感受器, 这些器官与柔性体表结构协同工作, 利用身体的形变特性实现对流场、压力与接触信号的机械放大与滤波, 从而在浑浊、湍流和低光等恶劣条件下依然保持稳定的环境感知能力。这种“柔顺结构-流场交互”的天然鲁棒性, 使仿生感知在陆到水、水到水面等跨介质过程中更能抵抗光衰减、声学反射、湍流扰动等环境突变, 是传统光学与声呐感知难以适应的。

受此启发, 仿生两栖机器人逐渐采用与柔性体结构深度耦合的分布式传感策略。例如, 人工侧线技术模拟鱼类侧线的压差检测能力, 能够在无视觉条件下实现自运动估计和流场识别。Zhai 等<sup>[90]</sup> 提出利用模态分解的可解释方法, 结合人工侧线传感阵列, 实现仿鱼机器人自运动状态的高鲁棒估计。凭借细长且高度柔顺的结构, 海豹触须能够被动放大涡街信号, 在自然界水下被动感知系统中表现出极高的灵敏度。受其启发的水下仿生触须传感器基于摩擦纳米发电机设计, 可被动检测尾流与涡结构,

在水下湍流与水面反射干扰严重时依然保持稳定输出, 用于低能耗的目标识别和流场感知<sup>[91]</sup>。进一步地, 在跨介质环境中, 多模态融合也逐渐成为仿生感知的重要趋势。例如, IBATR 智能仿生海龟机器人通过双模态卷积神经网络深度融合视觉与触觉信息, 使其能够在陆地与水面环境中实现对复杂地形的动态适应和智能行为切换, 从而在从水下出入水面或由水面登陆陆地的过程中维持连续可靠的环境理解。

因此, 相比传统依赖单一传感器的感知方式, 仿生感知通过柔顺结构、分布式器官与多模态融合的协同设计, 在陆-水的光衰减、在水-水面的声呐反射加强以及水面-陆地的触地冲击和纹理突变等跨介质场景中均展现出更强的环境适应性与抗干扰性, 使两栖机器人能够在复杂多变的陆、水等介质中保持稳定、连续的环境理解能力, 并为自主运动控制提供更为坚实的感知基础。

### 3.2 驱动

两栖机器人需要在“陆-水-跨域界面”三种典型介质间切换并保持可控推进, 驱动系统的选型与集成是性能上限的决定性因素之一。与单一环境的水下或陆地平台不同, 两栖场景同时施加了接触与非接触推进机制的兼容性、密封与防腐、功率密度与热管理以及跨介质动力学突变下的可控性等多重约束。因此, 近年的研究从“单一致动器最优”转向“机理-结构-控制”协同: 在硬件上强调异构驱动的可重构与轻量化, 在控制上强调节律生成、阻抗/顺应整定与在线能量分配。综合已有原型与实验, 现有的仿生两栖平台常用驱动方式可归纳为五大类: 电机驱动、光驱动、流体驱动 (PAM/FEA 等)、磁驱动、智能材料驱动 (SMA/IPMC/DE 等)。各驱动方式如表 2 所示。下文将围绕代表平台、跨介质机理与控制要点, 对这五类方案的适用边界与发展趋势进行系统梳理。

表 2 驱动方式表  
Table 2 Table of actuation methods

驱动类型	优势	局限性	典型案例
电机驱动	技术成熟, 控制精度较高	体积较大, 密封防水设计复杂	文献 [55, 92-93]
光驱动	无接触驱动, 微型化潜力大, 空间分辨率高	能量转换效率低, 受光源照射条件限制	文献 [73, 94]
流体驱动	PAM 柔顺性好, 功率重量比高, 适合复杂环境	控制精度低, 系统复杂, 气源依赖大	文献 [62-63, 95]
	FEA 柔顺性高, 安全性好, 结构简单	推力小, 适合轻载, 控制精度受限	文献 [64]
磁驱动	非接触式驱动, 密封性好, 适用于微型机器人	控制精度受磁场分布限制, 输出力矩较小	文献 [61, 96]
智能材料驱动	SMA 结构紧凑, 适合微小机构	能效低, 循环疲劳寿命有限	文献 [6, 66]
	IPMC 低电压驱动, 兼具传感与驱动功能	输出力和位移有限, 长期稳定性差	文献 [88]
	DE 轻薄柔顺, 响应快, 适合高频驱动	需高压驱动, 封装难度大, 易介电击穿	文献 [52]

1) 电机驱动

电机驱动主要以齿轮、连杆、轮履带等刚性传动构件为主, 通过形态变换、机构联动或机械耦合来在陆、水两种介质间切换工作模式. 电机驱动适用于负载需求较高、控制精度要求较强且需要明确驱动力来源的平台; 控制方法常结合位置、速度回路, 并通过 CPG 或有限状态机实现模式切换与稳定性保持.

Wang 等<sup>[44]</sup>研制的 AmphiRobot II 仿生机器人, 创新性地提出了一种将鱼类游动与轮-桨-鳍运动相结合的新型混合推进机构, 利用直流电机进行驱动, 其原理如图 17(a)<sup>[44]</sup>所示. Boxerbaum 等<sup>[55]</sup>借鉴蟑螂的多腿协同越障行为设计了 hegs-IV 两栖

平台, 将每肢设计为三辐“wheel-leg”结构, 由少量电机驱动, 实现轮滚与跨越障碍的混合功能. 该平台在陆地能够高效滚动和翻越障碍, 入水后轮辐则充当推进翅片, 实现无切换的陆-水连续运动. Zhang 等<sup>[92]</sup>仿照两栖动物和部分鱼类肢端既可走又可划水的结构, 将每条肢体设计为可变形“腿-鳍”结构, 在陆地上作为腿部推进, 而入水后转变形态为柔性鳍状推进器. Dudek 等<sup>[93]</sup>开发的 AQUA 系列两栖机器人, 其六足关节结构模仿了龟与青蛙的蹼状肢体. 在陆地环境下, 足端作为刚性腿支撑推进; 进入水下时, 六足转变为划水鳍片, 通过对称或非对称摆动实现推进与转向.

总体来看, 传统电机与推进驱动具有成熟、可

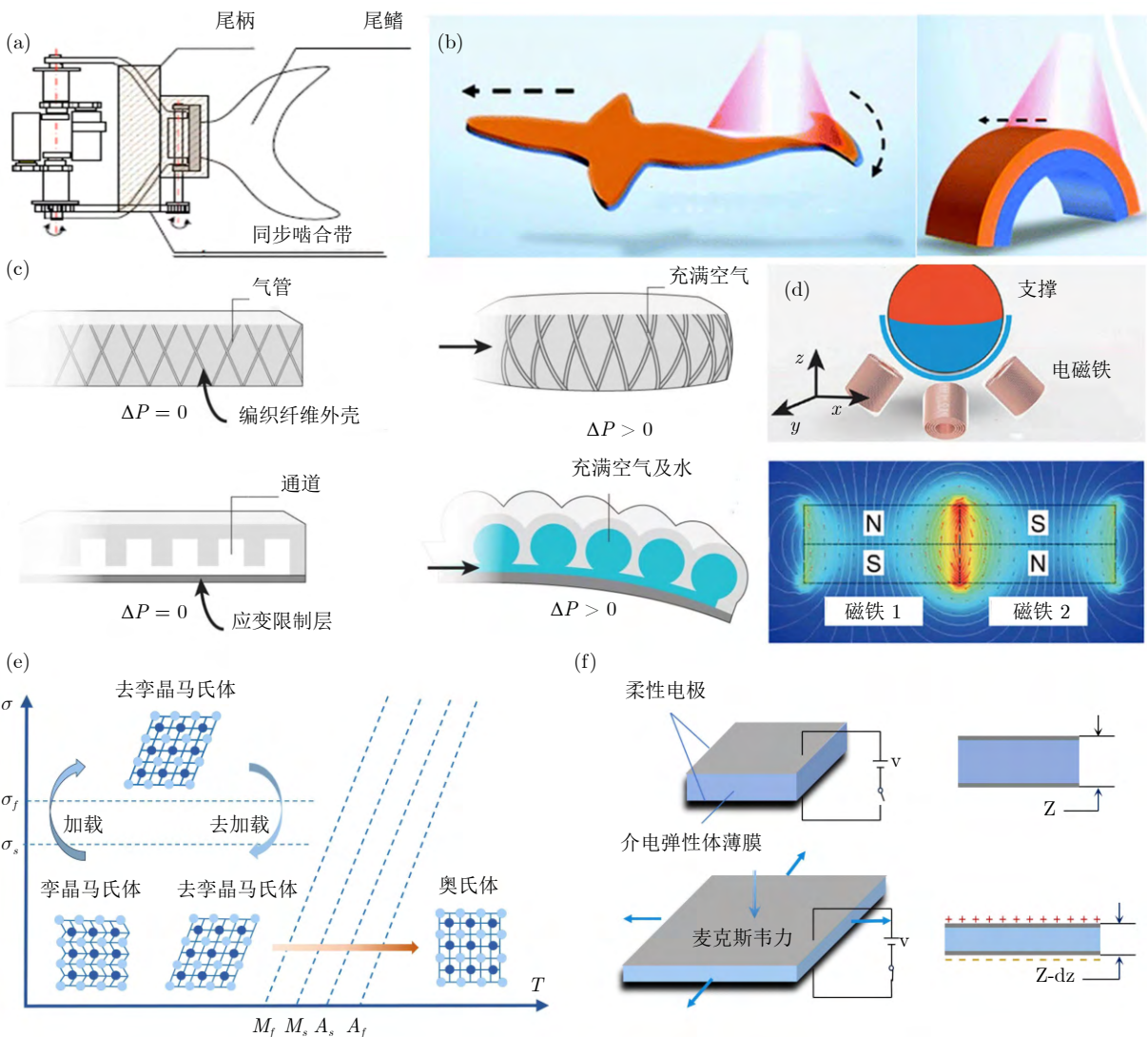


图 17 驱动方式原理图<sup>[44, 97-99]</sup>, 经许可转载自文献 [44, 97-99], ©IEEE, 2009; ©Royal Society of Chemistry, 2021; ©Springer Nature, 2015; ©Wiley, 2015

Fig. 17 Diagrams of actuation principles<sup>[44, 97-99]</sup>, reproduced with permission from reference [44, 97-99], ©IEEE, 2009; ©Royal Society of Chemistry, 2021; ©Springer Nature, 2015; ©Wiley, 2015

靠、易扩展的优势,但在水下环境中面临密封、防腐与模式切换的挑战。未来发展方向主要集中在轻量化推进器、推力矢量化控制以及与新型驱动方式的混合应用,以进一步提升两栖机器人在复杂环境下的适应性与任务能力。

### 2) 光驱动

光驱动在仿生两栖机器人中利用光能,特别是近红外光,通过光热效应或光响应材料的形变,实现驱动,其原理如图 17(b)<sup>[97]</sup>所示。目前常见的光驱动机制包括: a) 光热驱动,即材料吸收光能后产生局部加热,引发热膨胀或相变,进而产生形变; b) 光响应材料驱动,如含有光响应分子的材料,在光照下发生形态变化,驱动机器人运动。光驱动的优势在于其非接触、远程控制特性,适用于需要高精度控制和复杂环境适应的两栖机器人。

Xiang 等<sup>[73]</sup>提出了一种光驱动的仿生弹涂鱼机器人,该机器人由多孔硅橡胶和氧化石墨烯组成,能够响应近红外光的照射,实现快速的形变和运动。在近红外光照射下,材料发生光热效应,产生可逆的收缩应力,驱动机器人在空气中弯曲和在液体中爬行。此外,机器人还能在液体及空气界面上漂浮和游泳,甚至在近红外光照射下以极短的响应时间,从液体跳跃到空气中,展示出多功能的运动能力。

Zhu 等<sup>[94]</sup>研发了一种融合尺蠖与水龟仿生特征的水陆两栖微型机器人。该机器人采用光驱动实现远程无线操控,质量仅 8 mg,具备快速陆地运动、水面运动以及跨越障碍的能力,并可在陆地与水面间自由切换,展现出光驱动机器人在复杂环境应用中的巨大潜力。光驱动为仿生两栖机器人提供了一种非接触、远程可控的驱动方式,能够实现复杂的运动模式和环境适应性。近年来,光驱动技术在材料设计、结构优化和控制策略方面取得了显著进展,推动了机器人在多种应用场景中的发展。然而,光驱动系统仍面临能量效率、响应速度和控制精度等挑战,未来的研究将集中在提高光驱动系统的性能和拓展其应用范围,以满足更复杂任务的需求。

### 3) 流体驱动

流体驱动是仿生软体两栖机器人领域中被广泛应用的驱动方式之一。这种方法借鉴了自然界软体动物的运动机理,通过在超弹性材料中设计特殊的流体通道或结构,利用流体压力的变化来实现机器人的多样化运动,流体驱动主要分为液动和气动两种,其原理图如图 17(c)<sup>[98]</sup>所示。在软体两栖机器人中,PAM 和 FEA 是两种主要的流体驱动方式。PAM 由编织网包裹的橡胶管构成,充气时可产生轴向收缩,具备类似生物肌肉的力学特性,常用于机器人

关节驱动,以 McKibben 气动人工肌肉为代表;FEA 则由弹性体材料和一层应变限制层组成,加压时会产生弯曲、扭转、隆起等变形,其特点是变形后几乎不需要额外能量维持,能效较高。

基于气动人工肌肉的设计中,McKibben 执行器作为典型代表,因其由橡胶管与编织纤维套构成,能够在气压作用下将径向膨胀转化为轴向收缩,表现出类似生物肌肉的收缩特性。Faudzi 等<sup>[62]</sup>将一种直径仅 4 mm 的细软 McKibben 肌肉应用于四足两栖软体机器人,其腿部通过多条肌肉并联驱动,机体部分则结合塑料薄片实现弹性变形,从而获得类似蜥蜴和蝾螈的身体摆动和步态协调。有限元模拟与实验均表明,该机器人在平地、沙地和水下环境中均可实现稳定运动,凸显了气动人工肌肉在提供较大收缩力和仿生步态方面的优势。另一个基于气动人工肌肉的代表性工作是以尺蠖为灵感的多模态两栖软体机器人<sup>[63]</sup>。该设计的核心在于通过三条气动人工肌肉组合驱动,使机器人躯体产生类似生物尺蠖运动中的“Ω”形变,从而实现身体的伸缩与弯曲。

FEA 则通过腔体结构与材料非对称性实现复杂形变。例如,可切换黏附驱动的仿生两栖尺蠖软体机器人采用了极软双层弹性体结构,其上层嵌入螺旋气道,下层带有腔室。当气体充入时,上层膨胀形成三维穹顶,从而在腔室内产生负压,实现快速且可逆的黏附功能。该驱动单元与柔性弯曲执行器结合后,使机器人能够在干湿、光滑与半粗糙表面,甚至水下实现有效爬行与负载攀爬<sup>[64]</sup>。这一设计展示了 FEA 在复杂形变与环境适应性上的独特优势,也突出了其在未来多功能软体机器人中的潜力。

### 4) 磁驱动

磁驱动在仿生两栖机器人中常通过在柔性肢体或附肢中嵌入永久磁体来实现。当外加磁场作用时,永久磁体会受到力矩或吸附力,从而带动局部结构产生运动或增强环境适应性。在水环境中,这种磁驱动能辅助推进、控制姿态;在陆地或铁磁性基底上,磁吸附则提供了附着和牵引能力,使机器人能够跨越不同介质实现连续运动,其原理如图 17(d)<sup>[99]</sup>所示。Paschal 等<sup>[61]</sup>受海胆启发,研究的 sea-urchin-inspired robot 原型由五个柔性管足与十个刚性刺构成,机器人本体由独立驱动的软三脚架致动器控制各组管足的步态与推进。研究者在每根柔性管足的远端嵌入永久磁铁,使得机器人在遇到铁质表面时能够借助磁吸附获得牢固的接触、摩擦力,从而在铁质基底上轻松移动。这种管足远端的永久磁铁与软三脚架步态组合,使得原型既能在水中通过管足摆动与流体交互推进,又能在界面与陆地上运动。

Bell 等<sup>[96]</sup> 提出并实现的 ASTER-bot, 是一款以海星管足与腕部功能为仿生原型的软体机器人. 研究者将可重复部署的磁性管足作为核心部件, 使机器人能对铁质等有磁性的基底实现可逆、定位的吸附与脱附, 并将这些磁性管足与独立可寻址的柔性臂与自含流体发动机耦合, 从而在铁质表面上以及水上、水下环境中实现稳定的移动与姿态控制. 通过磁性管足、流体发动机、模块化手臂的组合, ASTER-bot 能在 ferrous surfaces 上方、下方以及非平面表面执行行走与操控任务.

磁驱动为仿生两栖机器人提供了一种非接触、可远程操控的能量与运动转换途径. 通过在柔性体内嵌入永久磁体, 机器人能够在不同环境下实现多模态运动, 既能模仿自然生物在水中的推进方式, 又能利用磁吸附增强在陆地或特定表面上的稳定性和机动性. 这种方法为机器人在复杂环境中的作业提供了高自由度和多功能性, 展现出在未来微型化、任务多样化的两栖机器人设计中的广阔潜力.

#### 5) 智能材料驱动

SMA 驱动依赖于形状记忆合金在受热时发生可逆相变并产生收缩这一物理特性: 对嵌入结构中的 SMA 丝进行加热并按时序通断, 可以把热致收缩转化为臂和足的弯曲、摆动或伸缩动作, 从而实现水下或陆地的推进与牵引, 其原理图如图 17(e) 所示. 研究者基于 SMA 的独特驱动特性, 提出了多种仿生软体机器人方案. SMA 具备较高的功率密度、可实现大幅度变形, 并且能够在柔性结构中集成, 从而为复杂运动提供可能. 例如, PATRICK 机器人受棘皮动物 (蛇尾) 启发, 采用 20 根 SMA 线驱动五条柔性腿, 实现了多样化的运动模式, 并首次展示了水下无缆软体机器人的闭环运动规划与目标追踪能力<sup>[66]</sup>. 另一项工作则以海星为原型, 设计了基于智能模组结构的仿生机器人<sup>[6]</sup>, 其触腕通过 SMA 线驱动产生快速的往复运动, 并结合自适应调控加热策略, 有效避免过热、拓宽弯曲范围并提升响应速度, 从而在半浸入和水下环境中实现高效推进. 与传统驱动方式相比, SMA 驱动赋予机器人更接近生物肌肉的柔性运动特征, 使其在仿生爬行与游动方面展现出显著优势.

EAP 材料作为一种新型智能材料, 具有在施加电场后驱动力大、形变大等特点<sup>[100]</sup>, 广泛应用于仿生机器人、航空航天工程等<sup>[101]</sup> 多个领域. 根据 EAP 智能驱动材料的电驱动原理, 可分为离子型 EAP 和电子型 EAP 两大领域.

离子型 EAP 的代表材料是离子聚合物——金属复合材料 (ionic polymer metal composite, IP-

MC). Li 等<sup>[88]</sup> 展示了一个受小龙虾启发的微型机器人, 该机器人具备两只螯足和八条步足, 由十个 IPMC 致动器驱动, 并展示了 IPMC 的电驱动原理. 当两个柔性电极通电时, 水合阳离子均匀分布在材料内部, 在施加的电场作用下, 它们向负极移动并聚集. 这表现为材料向正极弯曲并在宏观层面产生变形.

电活性聚合物 (EAP) 是一类在电场刺激下可产生显著形变的智能材料. 其中, 介电弹性体 (dielectric elastomer, DE) 可在高电压下产生高达 380% 的应变, 其原理图如图 17(f) 所示, 常用于软体机器人驱动器. 其材料包括聚氨酯、聚丙烯酸酯和有机硅, 分别具备高介电常数、极大变形和优异稳定性的特点. 新加坡国立大学的研究者<sup>[52]</sup> 制作了一种仿生青蛙机器人, 采用 DEAs 作为核心驱动, 能够实现类似青蛙的游泳运动. DEAs 具备大变形、高能量密度、快速响应和轻量化等“类肌肉”特性, 使得机器人的蹼足在高电压下投影面积增加 66%, 推力提升 34.5%. 整机质量仅 108 g, 其中 DEAs 仅占 13%, 最终实现了 19 mm/s 的游泳速度, 展示了 DE 驱动在仿生水下机器人的应用潜力.

### 3.3 控制策略

复杂的两栖环境要求两栖机器人具有较强的环境适应性、运行稳定性和可控性<sup>[102]</sup>. 因此在机器人学领域诞生了多种控制策略. 本文聚焦于仿生两栖机器人, 总结现有的控制方法, 总体可以分为三类: 行为驱动型控制方法、模型驱动型控制方法、生物神经网络控制方法<sup>[35, 103]</sup>, 其控制图如图 18 所示.

#### 1) 行为驱动型控制方法

在现有研究中, 行为驱动型控制方法是最早应用于仿生两栖机器人的控制方式, 尤其适用于以体波推进为主的机器人. 体波推进 (如蛇、鳗鱼、泥鳅等) 的核心是通过幅值、频率和波长调控实现连续的行波, 这类运动具备高度柔顺性、高维分布式协调与强非线性等特点, 使得精确建模十分困难. 因此, 更适合采用行为驱动控制, 即通过模仿生物的节律、动作序列和形态变化来生成整体波形或协调模式, 从而实现对复杂运动行为的快速复制.

最具代表性的行为驱动控制方法是 Hirose 提出的 Serpenoid 曲线模型. 该模型以正弦函数描述蛇体沿纵向的连续曲率分布, 能够准确刻画蛇类侧向波动时的典型体波形态. 在此模型之上, 相关研究进一步拓展其控制能力, 以适应更复杂的运动任务和环境约束. 例如, Li 等<sup>[104]</sup> 通过引入关节幅值调节因子和转角调节因子构建改进型 Serpenoid 曲线, 以实现多关节冗余系统的高效运动规划与闭环

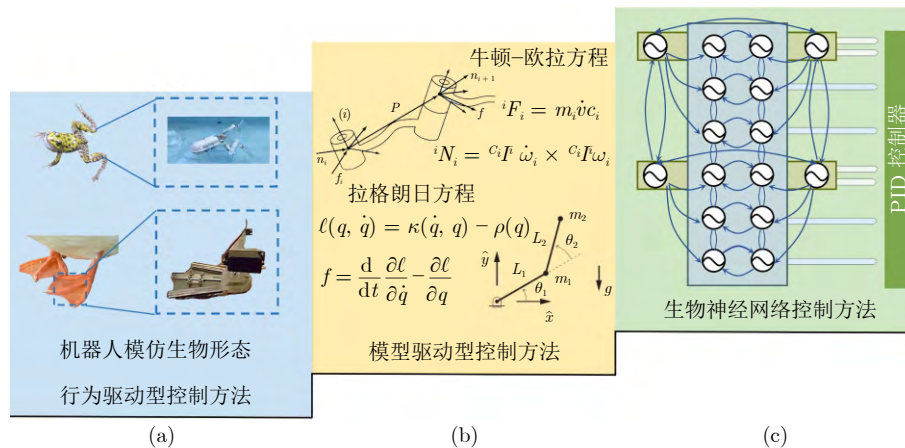


图 18 控制策略图 ((a) 行为驱动型控制方法图; (b) 模型驱动型控制方法图; (c) 生物神经网络控制方法图)

Fig. 18 Control strategy diagrams ((a) Behavior-driven control method diagram; (b) Model-driven control method diagram; (c) Biological neural network control method diagram)

推进控制; 之后该团队将 Serpenoid 曲线融入自适应控制结构, 利用时变幅值函数增强机器人在未知摩擦环境中的路径跟踪性能<sup>[105]</sup>; 此外, Wang 等<sup>[106]</sup>通过系统分析传统调制方法并提出切向控制与组合调制策略, 解决了转弯角度受限、关节不连续及转弯半径偏大等问题. 总体而言, Serpenoid 曲线不仅构成蛇形机器人波行为的核心理论依据, 也为其多模式、可调节和高稳定性的运动控制提供了重要扩展方向.

在支腿式仿生两栖机器人中, 尽管其推进机制属于肢体推进, 但早期研究同样多采用行为驱动控制, 即以模仿生物行为规律为核心, 通过经验步态或结构启发生成动作模式. 例如, 玄武蜥在踏水奔跑时主要依靠脚掌下压产生的瞬时升力而非浮力或表面张力, Xu 等<sup>[107]</sup>基于这一行为规律, 分析了脚掌凹陷运动在水面产生的反作用力, 并进一步设计了仿生双足机器人以复制这种特殊行为模式. Roboterp 机器人<sup>[108]</sup>通过切换不同步态实现从陆行到水中行走的行为迁移; Luo 等<sup>[109]</sup>提出的 QAR 利用五杆机构模仿水陆动物的推进节律; Kashem 等<sup>[76]</sup>通过模仿鸭脚开合动作开发了克兰连杆机构. 这些方法的共同点是强调“生物行为的再现”而非动力学精确建模, 因此本质上属于行为驱动控制, 但也因难以完整复刻生物结构而体现出一定局限性.

为克服单一仿生行为的局限, 研究者提出了混合型行为驱动控制方法, 即将多种生物的行为规律整合到一个机器人体系中. 例如, SeaDog 机器人采用箱式防护机身, 利用四个辐条状轮腿实现类似昆虫的越障能力, 并借鉴龙虾的尾部机制, 通过尾部摆动和调节姿态来辅助水下推进与陆地攀爬. 这种跨物种的机制融合提升了机器人在海滩及冲浪区

的环境适应性<sup>[110]</sup>. 但由于缺乏环境反馈调节与真实动力学约束, 整体智能性有限, 难以应对复杂两栖场景, 因此逐渐被模型驱动与神经网络控制方法所替代.

## 2) 模型驱动型控制方法

模型驱动型控制策略通常适用于具有明确结构动力学特征的鳍推进与肢体推进两栖机器人. 与体波推进系统相比, 鳍、桨、肢体等驱动形式的运动学结构更具确定性, 其受力、关节拓扑与推进机制可以通过连续介质动力学与刚体动力学较为准确地描述. 因此, 在此类系统中, 通过建立运动学或动力学模型进行规划, 再结合闭环反馈校正偏差, 是目前主流且有效的控制路线.

典型的鳍推进两栖机器人依赖蒙皮鳍、硬鳍或桨状结构在水下产生升力、阻力差与涡流相互作用, 因此模型驱动控制能够直接建立从鳍片摆动频率、攻角到推进力的映射. 在陆地模式中, 这类机器人往往依赖肢体、轮腿或关节支撑结构完成步态切换, 因此同样需要精确的接触与地面反作用力建模. 例如, Xing 等<sup>[111]</sup>的微型仿生两栖球形机器人 ASRobot 先基于简化爬行运动学模型优化陆地上步态, 并结合在线参数调节获得更稳定的斜坡爬行能力; 在水下则利用流体动力模型设计实时推力矢量分配, 通过四通道并行 PID 同步解算推进力与姿态控制量, 实现水陆一体化轨迹控制 (见图 19(a) ASRobot 基于模型的控制网络图<sup>[111]</sup>).

在更广泛的应用中, 部分两栖机器人通过“结构-模型-控制”协同设计实现多模态运动<sup>[55, 112]</sup>. Whigs IV 采用源自蟑螂步态的轮腿式肢体推进结构并结合桨推进, 使其能在海滩、浪区等复杂环境完成爬行、涉水与游动三种模式; 其控制方法是先

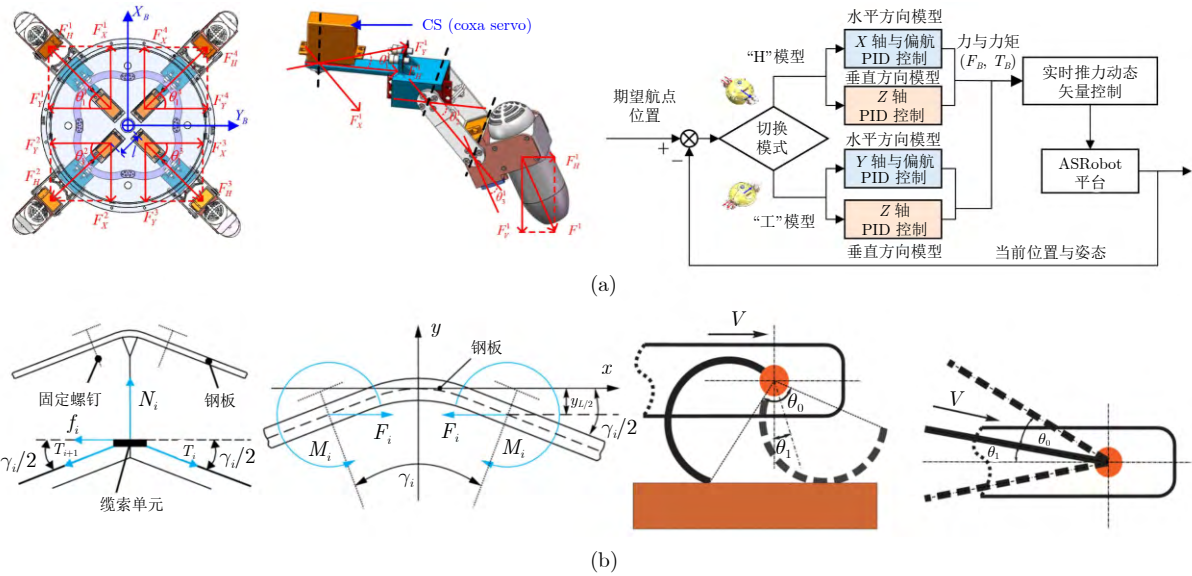


图 19 模型驱动的控制方法<sup>[111, 113]</sup>, 经许可转载自文献 [111, 113], ©Elsevier, 2021; ©IEEE, 2016

Fig. 19 Model-driven control methods<sup>[111, 113]</sup>, reproduced with permission from reference [111, 113], ©Elsevier, 2021; ©IEEE, 2016

基于力学模型设计轮腿接触动力学与桨叶水动力, 再通过模型切换实现任务级自主规划. AmphiHex-I 采用基于可变形鳍-腿运动学模型的控制策略, 通过调节关键运动学参数在“弯曲旋转”与“伸直摆动”两种构型间切换, 以适应水陆环境 (见图 19(b) 基于力学模型的轮腿式结构图<sup>[113]</sup>).

在建模方法上, 工程界通常采用牛顿-欧拉方程与拉格朗日方程对刚体系统进行建模, 并结合 Kane 方法或哈密顿变形式用于多体强约束系统的推导. Featherstone 的递归刚体算法进一步提升了高自由度系统的逆动力学效率. 这些建模工具的可解析性和针对性, 使模型驱动控制能高效地为鳍、肢体以及轮腿式两栖机器人生成稳定的轨迹与力矩指令.

然而, 两栖机器人面临介质性质突变 (空气-水-泥)、流固耦合、间歇接触等高度不确定因素, 使精确模型在实时控制中代价过高. 因此, 当前研究普遍采用“精确建模 + 合理近似”的混合策略, 例如, 利用附加质量与流体阻尼的参数化形式简化水动力表达; 构建分层控制体系, 上层使用降阶模型进行在线规划 (如推力矢量分配、肢体步态参数生成), 下层基于高保真模型或经验反馈执行精确控制. 该类方法在保持模型驱动可解释性优势的同时, 也兼顾了两栖跨介质任务对实时性的要求.

### 3) 生物神经网络控制方法

在各类仿生推进机制中, 无论是蛇、鳗鱼等的体波推进, 鱼类尾鳍和胸鳍的鳍推进, 还是两栖与四足动物的肢体推进, 其共同特征都是依赖周期性

节律运动来产生推进力. 因此, 在控制方法上, 它们均可以被统一纳入以节律生成机制为核心的框架中, 其中最具代表性的便是 CPG 控制. CPG 本质上由一组非线性耦合振荡器构成, 能够无需外部节律输入, 自动产生具有稳定频率、幅值和相位关系的周期信号. 由于这种控制方式聚焦于“时间节律的生成”, 而非依赖某种特定推进模型, 理论上所有以周期摆动为主要驱动形式的仿生推进方式均能够由 CPG 描述与驱动<sup>[114]</sup>. 尽管 CPG 在控制原理上具有广泛的普适性, 但在具体仿生控制中, 需针对不同的推进模式设计特定的网络拓扑结构与参数映射机制. 具体而言, 在体波推进中, CPG 网络需被构建以生成沿体轴传递的连续相位梯度行波; 在鳍推进中, CPG 则需协调多自由度鳍条的耦合振荡以合成复杂的二维波形; 在肢体推进中, 控制重点在于利用振荡器间的相位锁定关系, 实现多肢体间的步态协同与时序组织.

Golubitsky 等<sup>[115]</sup> 系统描述了一种经典的四足动物 CPG 网络结构 (见图 20(a) 双足、四足、 $2n$  足动物 CPG 网络示意图<sup>[35]</sup>). 瑞士洛桑联邦理工学院的 Ijspeert 等<sup>[35]</sup> 将脊髓模型引入仿生机器人, 展示了从游泳到行走的模式切换, 表明脊髓网络的结构与参数能够解释两栖动物的运动转换机制 (见图 20(b) Salamandra robotica I CPG 网络控制图<sup>[115]</sup>). 其 Salamandra robotica II 将脊髓 CPG 模型与机器人硬件耦合, 实现水中鳗式游动与陆地上步行的平滑切换, 并验证了肢体与躯干振荡器频率关系对模式转换的影响<sup>[35]</sup>; Pleurobot 则通过高自由度脊柱与

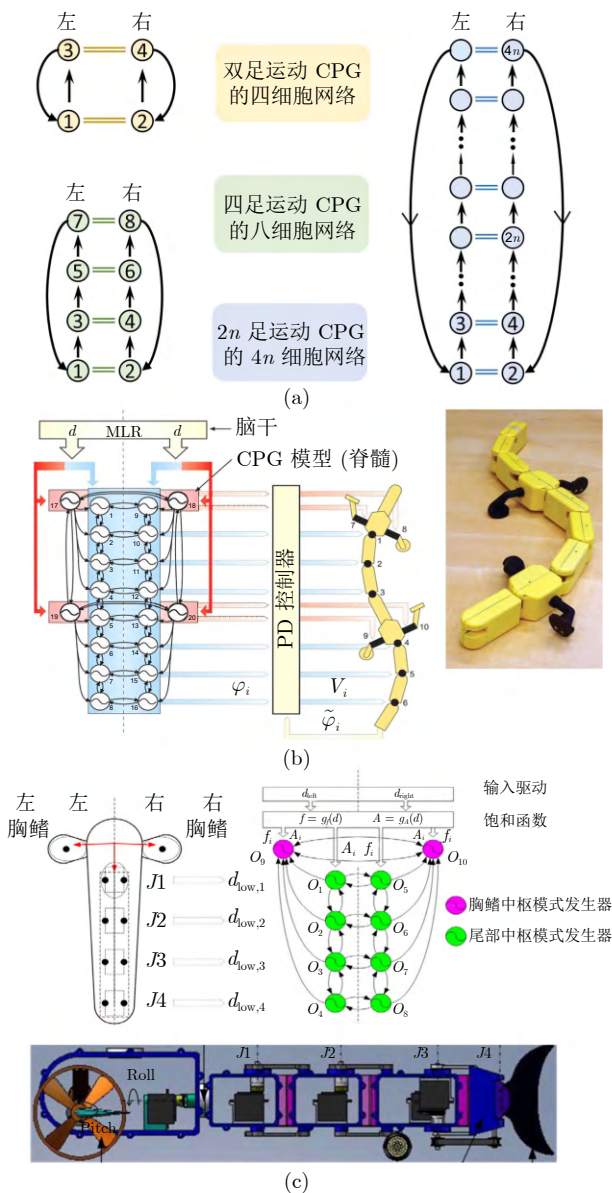


图 20 中枢模式发生器<sup>[35, 115, 117]</sup>, 经许可转载自文献 [35, 115, 117], ©AAAS, 2007; ©Springer Nature, 1999; ©SAGE Publications Inc, 2013

Fig. 20 Central pattern generator<sup>[35, 115, 117]</sup>, reproduced with permission from reference [35, 115, 117], ©AAAS, 2007; ©Springer Nature, 1999; ©SAGE Publications Inc, 2013

肢体机构重建动物运动学, 以机器人平台验证并扩展脊髓 CPG 模型在多关节系统中的作用机制<sup>[40]</sup>. Mat-suo 等<sup>[116]</sup>的 CPG 控制系统实现了基于 CPG 的多节体联合推进节律生成, 并与动力学模型耦合以实现方向控制与动力分配. Ding 等<sup>[117]</sup>将 CPG 控制与拉格朗日动力学模型相结合, 实现了鱼类式体波与胸鳍协同推进的稳态游动及爬行, 使机器人能够实现包括前进、后退和转向等在内的稳健游泳步

态 (见图 20(c) AmphiRobot II CPG 网络控制图<sup>[117]</sup>).

综上所述, 仿生两栖机器人的控制策略与其推进机构的结构属性和环境交互机制存在深刻的内在耦合. 体波推进系统如蛇类与鱼类, 依赖连续介质形变和高维分布式协调, 其柔顺性与冗余度使精确建模困难, 因此更适合采用行为驱动方法或具有拓扑与节律自适应能力的 CPG 网络, 以生成空间连续的行波与稳健的节律模式; 鳍、肢体与轮腿式推进则具有明确的刚体拓扑与离散接触结构, 其水动力与接触动力学可通过连续介质力学或多刚体动力学进行解析, 更契合模型驱动控制以实现推力矢量、地面反力等关键力学量的精确求解. 然而, 两栖环境跨介质带来的强非线性和高度不确定性使单一控制范式难以兼顾适应性与精确性. 为此, 当前研究逐渐迈向“节律生成 (CPG) + 动力学调制 (模型驱动)”的混合控制架构, CPG 作为底层统一节律来源, 实现多自由度系统的步态协同与环境自适应; 简化动力学模型则用于关键参数的前馈补偿与反馈修正, 确保力学一致性与模式切换稳定性. 该融合框架在“节律驱动”与“结构约束”之间建立统一机制, 不仅弥合了柔性体波与刚性肢体在控制机理上的差别, 也为两栖机器人在非结构化、多模态、多介质任务中实现高机动性与高稳态性能提供了系统化、可扩展的解决方案.

## 4 现存挑战与未来展望

### 4.1 现存挑战

尽管近年来水陆仿生两栖机器人在运动机理、材料应用与多模态控制等方面取得了显著进展, 但仍存在诸多亟待解决的问题. 首先, 不同环境介质之间的物理特性差异极大, 例如水的高密度与高黏度、陆地的高摩擦以及泥沙环境的强阻尼, 使得现有机器人在跨介质运动时普遍面临适应性不足的问题, 尤其在滩涂、湿地或泥沙等过渡环境中, 其运动效率和稳定性显著下降. 现有的大部分水陆两栖机器人仅能实现陆地和水下两种运动模态, 很少能够真正实现野外跨水域登陆. 与之相比, 自然界中的两栖动物则展现出卓越的结构紧凑性与柔韧性, 它们凭借刚柔并济的身体构造和高效的能量传递机制, 能够在异质介质间实现流畅适配与稳定切换, 表现出令人瞩目的跨介质运动能力. 当前主流的机器人多依赖刚性电机与连杆传动结构, 例如, AmphiHex-I 主要依赖体型较大的鳍肢进行摆动, 其运动性能与自然生物相比仍有差距, 而仿生蛇形机器人通过串联关节来模拟脊柱运动, 虽然具备一定的

三维运动能力,但控制复杂且稳定性与灵活性不足。尽管柔性驱动器在结构紧凑性与轻量化方面更接近自然生物的形态优势,但其控制精度和可重复性仍然较差,往往仅停留在实验室内完成一些简单动作,相较于刚体运动来说,其还面临着运动速度较慢的局限,如利用 SMA 驱动的 PATRICK<sup>[66]</sup> 等。

同时,能源与续航能力也是制约水陆仿生两栖机器人走向实际应用的关键瓶颈。自然界生物经过长期进化,其能量利用效率已经达到极高水平,远远超过现有的人工驱动方式。然而,仿生机器人在执行任务时需要独立跨越多种复杂地形,对机载能源的需求极为庞大。由于能源利用效率有限,现阶段常用的锂电池难以支撑长时间连续作业,尤其在泥泞或水流环境中能耗更为显著,而自供能与能量回收技术尚不成熟,这严重限制了其在野外的持久作业与自主运行能力。

感知与定位技术同样面临困难,水下与泥下环境使得视觉、无线通信以及常规传感器性能大幅衰减,导致机器人难以获取准确的环境信息,限制了任务执行的稳定性与精度。现有机器人在智能化与自主性方面仍显不足,大多数原型机仍停留在实验室验证阶段,缺乏在复杂未知环境中进行自主决策、路径规划与任务执行的能力。因此,如何提升跨介质适应性、实现高效能源管理、开发耐久材料以及增强智能感知与自主性,将是推动水陆仿生两栖机器人走向实际应用的关键挑战。

#### 4.2 未来展望

未来水陆仿生两栖机器人的发展,关键在于突破跨水域运动的适应性与连续性。尽管现有机器人在单一环境(如水下或陆地)中已经能够实现较为稳定的运动,但在自然场景下,复杂的水陆过渡环境(如滩涂、湿地、泥沙等)仍然是实现自主登陆和长距离作业的最大障碍。自然生物在跨介质运动中往往能够通过体态调整、形态变化及能量高效利用实现流畅切换,而现有机器人在这一方面仍存在明显差距。因此,未来的研究需要探索更加高效的仿生结构与柔性材料,发展能够自适应介质差异的推进与控制机制,从而提升机器人在多介质过渡区域的运动效率与稳定性。

另一方面,智能化的发展是推动仿生机器人迈向实际应用的另一关键方向。传统机器人依赖外部控制和简单感知,难以在复杂环境中实现真正的自主运行。随着人工智能、强化学习及新一代控制算法的快速发展,结合具身智能<sup>[118]</sup>与物理智能<sup>[10]</sup>的

理念,为机器人提供了新的发展路径。具身智能强调感知-运动-环境之间的紧密耦合,使机器人能够像自然生物一样通过与环境交互不断学习与适应;物理智能则通过在材料与结构中嵌入反馈机制,使机器人在无需复杂外部控制的情况下,也能展现自我调节与自组织的能力。例如,通过在材料层面设计非线性延迟反馈机制,可使机器人在恒定刺激下产生延时响应,从而实现自主运动和决策。这类方法有望突破现有软体驱动器仅能完成简单动作的局限,使机器人逐步具备自感知、自决策与自执行的能力。

例如, Dong 等<sup>[119]</sup>将物理智能思想应用于仿生两栖机器人设计,通过将可折叠的 origami 结构与高度可拉伸的自体电阻传感层相结合,使机器人机体在承担结构功能的同时具备基础的环境感知能力,从而在陆地与水域等不同介质中实现基于形态变化的多模态运动(如前进、转向与游泳)及其驱动-反馈闭环设计,体现了具身智能“身体即传感器-执行器”的设计理念。在控制策略层面, Yao 等<sup>[120]</sup>提出了一种学习型推进控制框架,利用强化学习训练神经网络以协调带有推进器的四足机器人在水中与陆地运动模式之间的推进与切换,使系统在存在环境扰动或局部执行器失效的情况下仍能够保持较好的速度与轨迹跟踪性能,体现了数据驱动控制策略与机体动力学特性之间的协同作用,但该研究目前仅局限于仿真层面,尚未在实体机器人上进行实验验证。此外,在感知融合方面, IBATR 构建了一个视觉-触觉融合感知体系,通过将视觉信息与肢体接触反馈相结合,实现对复杂地形的在线识别与能量效率导向的步态调节,显著提升了机器人在陆-水介质交界区域及复杂地形条件下的运动效率与动态适应能力,反映了具身智能中感知信息直接参与机体-控制协同生成运动策略的研究思路。

然而,从整体发展水平来看,具身智能与物理智能在水陆仿生两栖跨介质机器人中的应用仍处于探索阶段,现有研究多集中于单一功能模块或特定任务场景,部分方法尚停留在仿真验证层面,尚未形成面向真实复杂环境的系统化设计方法。特别是在水-陆介质突变、界面动力学强耦合以及连续跨介质运动等关键问题上,如何充分发挥机体形态、材料特性与感知反馈在智能行为生成中的作用,仍有待深入研究。未来,有必要从结构、材料、感知与控制的协同演化角度出发,结合软体结构、本体感知与自适应学习方法,推动水陆仿生两栖跨介质机器人逐步具备更高水平的自感知、自调节与环境适应能力。

综上所述, 未来水陆仿生两栖机器人的发展趋势将集中在跨水域运动的适应性突破与智能化水平的提升. 只有在材料、结构与算法层面实现深度融合, 才能真正推动机器人从实验室原型走向野外应用, 具备类似自然生物的自主性和适应性.

### 参考文献

- Nyakatura J A, Melo K, Horvat T, Karakasiliotis K, Allen V R, Andikfar A, et al. Reverse-engineering the locomotion of a stem amniote. *Nature*, 2019, **565**(7739): 351–355
- Cui L, Cheong P, Adams R, Johnson T. AmBot: A bio-inspired amphibious robot for monitoring the swan-canning estuary system. *Journal of Mechanical Design*, 2014, **136**(11): Article No. 115001
- Tadakuma K, Tadakuma R, Aigo M, Shimojo M, Higashimori M, Kaneko M. “Omni-paddle”: Amphibious spherical rotary paddle mechanism. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011. 5056–5062
- Greiner H, Shectman A, Won C, Elsley R, Beith P. Autonomous legged underwater vehicles for near land warfare. In: Proceedings of the Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology. Monterey, USA: IEEE, 1996. 41–48
- Chu W S, Lee K T, Song S H, Han M W, Lee J Y, Kim H S, et al. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, **13**(7): 1281–1292
- Jin H, Dong E B, Alici G, Mao S X, Min X, Liu C S, et al. A starfish robot based on soft and smart modular structure (SMS) actuated by SMA wires. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, **11**(5): Article No. 056012
- Shintake J, Cacucciolo V, Shea H, Floreano D. Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators. *Soft Robotics*, 2018, **5**(4): 466–474
- Chang L F, Liu Y F, Yang Q, Yu L F, Liu J Q, Zhu Z C, et al. Ionic electroactive polymers used in bionic robots: A review. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, **15**(5): 765–782
- Marchese A D, Katzschmann R K, Rus D. A recipe for soft fluidic elastomer robots. *Soft Robotics*, 2015, **2**(1): 7–25
- Chen C, Shi P J, Liu Z X, Duan S D, Si M Q, Zhang C W, et al. Advancing physical intelligence for autonomous soft robots. *Science Robotics*, 2025, **10**(102): Article No. eads1292
- Bai X J, Shang J Z, Luo Z R, Jiang T, Yin Q. Development of amphibious biomimetic robots. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2022, **23**(3): 157–187
- Stin V, Godoy-Diana R, Bonnet X, Herrel A. Form and function of anguilliform swimming. *Biological Reviews*, 2024, **99**(6): 2190–2210
- Shadwick R E, Gemballa S. Structure, kinematics, and muscle dynamics in undulatory swimming. *Fish Physiology*, 2005, **23**: 241–280
- Gemballa S, Vogel F. Spatial arrangement of white muscle fibers and myoseptal tendons in fishes. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2002, **133**(4): 1013–1037
- Stin V, Godoy-Diana R, Bonnet X, Herrel A. Measuring the 3D wake of swimming snakes (*Natrix tessellata*) using volumetric particle image velocimetry. *Journal of Experimental Biology*, 2023, **226**(13): Article No. jeb245929
- Tytell E D, Lauder G V. The hydrodynamics of eel swimming: I. Wake structure. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**(11): 1825–1841
- Gemmell B J, Fogerson S M, Costello J H, Morgan J R, Dabiri J O, Colin S P. How the bending kinematics of swimming lampreys build negative pressure fields for suction thrust. *Journal of Experimental Biology*, 2016, **219**(24): 3884–3895
- Kern S, Koumoutsakos P. Simulations of optimized anguilliform swimming. *Journal of Experimental Biology*, 2006, **209**(24): 4841–4857
- Jayne B C. What defines different modes of snake locomotion? *Integrative and Comparative Biology*, 2020, **60**(1): 156–170
- Kopman V, Porfiri M. Design, modeling, and characterization of a miniature robotic fish for research and education in biomimetics and bioinspiration. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, **18**(2): 471–483
- Menzer A, Gong Y C, Fish F E, Dong H B. Bio-inspired propulsion: Towards understanding the role of pectoral fin kinematics in manta-like swimming. *Biomimetics*, 2022, **7**(2): Article No. 45
- Burke A C. Development of the turtle carapace: Implications for the evolution of a novel bauplan. *Journal of Morphology*, 1989, **199**(3): 363–378
- Mayerl C J, Capano J G, Moreno A A, Wyneken J, Blob R W, Brainerd E L. Pectoral and pelvic girdle rotations during walking and swimming in a semi-aquatic turtle: Testing functional role and constraint. *Journal of Experimental Biology*, 2019, **222**(24): Article No. jeb212688
- Leavey A, Richards C T, Porro L B. Comparative muscle anatomy of the anuran pelvis and hindlimb in relation to locomotor mode. *Journal of Anatomy*, 2024, **245**(5): 751–774
- Clemente C J, Richards C. Muscle function and hydrodynamics limit power and speed in swimming frogs. *Nature Communications*, 2013, **4**(1): Article No. 2737
- Astley H C, Roberts T J. Evidence for a vertebrate catapult: Elastic energy storage in the plantaris tendon during frog jumping. *Biology Letters*, 2012, **8**(3): 386–389
- Okamoto E, van Mai H, Ishimatsu A, Tanaka M. Modification of pectoral fins occurs during the larva-to-juvenile transition in the mudskipper (*Periophthalmus modestus*). *Zoological Letters*, 2018, **4**: Article No. 23
- Ning L X H, Limpabandhu C, Tse Z T H. Amphibian-inspired locomotion strategy for a slime-based magnetic soft robot. *Robotics Reports*, 2024, **2**(1): 152–165
- Pace C M, Gibb A C. Mudskipper pectoral fin kinematics in aquatic and terrestrial environments. *Journal of Experimental Biology*, 2009, **212**(14): 2279–2286
- Deeg K E, Sears I B, Aizenman C D. Development of multisensory convergence in the *Xenopus* optic tectum. *Journal of Neurophysiology*, 2009, **102**(6): 3392–3404
- Navarro-Guerrero N, Toprak S, Josifovski J, Jamone L. Visuo-haptic object perception for robots: An overview. *Autonomous Robots*, 2023, **47**(4): 377–403
- Cohen A H, Wallén P. The neuronal correlate of locomotion in fish. “Fictive swimming” induced in an in vitro preparation of the lamprey spinal cord. *Experimental Brain Research*, 1980, **41**(1): 11–18
- Combes D. Metamorphosing motor networks. *Current Biology*, 2019, **29**(12): R557–R561
- Sillar K T, Simmers J, Combes D. From tadpole to adult frog locomotion. *Current Opinion in Neurobiology*, 2023, **82**: Article No. 102753
- Ijspeert A J, Crespi A, Ryczko D, Cabelguyen J M. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. *Science*, 2007, **315**(5817): 1416–1420
- Ijspeert A J. Amphibious and sprawling locomotion: From biology to robotics and back. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2020, **3**(1): 173–193
- Suzuki S, Kano T, Ijspeert A J, Ishiguro A. Spontaneous gait transitions of sprawling quadruped locomotion by sensory-driven

- en body-limb coordination mechanisms. *Frontiers in Neurobotics*, 2021, **15**: Article No. 645731
- 38 Wang J, Zheng J Y, Zhao Y H, Yang K. Structure design and coordinated motion analysis of bionic crocodile robot. *Bioimetic Intelligence and Robotics*, 2024, **4**(2): Article No. 100157
- 39 Li L, Qin B Y, Gao W Z, Li Y Y, Zhang Y Y, Wang B, et al. Bioinspired underwater soft robots: From biology to robotics and back. arXiv preprint arXiv: 2508.11883, 2025.
- 40 Karakasiliotis K, Thandiackal R, Melo K, Horvat T, Mahabadi N K, Tsitkov S, et al. From cineradiography to biorobots: An approach for designing robots to emulate and study animal locomotion. *Journal of the Royal Society Interface*, 2016, **13**(119): Article No. 20151089
- 41 Melo K, Horvat T, Ijspeert A J. Animal robots in the African wilderness: Lessons learned and outlook for field robotics. *Science Robotics*, 2023, **8**(85): Article No. eadd8662
- 42 Floyd S, Sitti M. Design and development of the lifting and propulsion mechanism for a biologically inspired water runner robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, **24**(3): 698–709
- 43 Maladen R D, Ding Y, Umbanhowar P B, Kamor A, Goldman D I. Mechanical models of sandfish locomotion reveal principles of high performance subsurface sand-swimming. *Journal of the Royal Society Interface*, 2011, **8**(62): 1332–1345
- 44 Wang W B, Yu J Z, Ding R, Tan M. Bio-inspired design and realization of a novel multimode amphibious robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Shenyang, China: IEEE, 2009. 140–145
- 45 Asada T, Furuhashi H. Development of a manta ray robot with underwater walking function. *Ocean Engineering*, 2024, **308**: Article No. 118261
- 46 Shi L W, Guo S X, Mao S L, Yue C F, Li M X, Asaka K. Development of an amphibious turtle-inspired spherical mother robot. *Journal of Bionic Engineering*, 2013, **10**(4): 446–455
- 47 Han B, Luo X, Wang X J, Chen X D. Mechanism design and gait experiment of an amphibian robotic turtle. *Advanced Robotics*, 2011, **25**(16): 2083–2097
- 48 Baines R, Patiballa S K, Booth J, Ramirez L, Sippl T, Garcia A, et al. Multi-environment robotic transitions through adaptive morphogenesis. *Nature*, 2022, **610**(7931): 283–289
- 49 Yoo S Y, Shim H, Jun B H, Park J Y, Lee P M. Design of walking and swimming algorithms for a multi-legged underwater robot Crabster CR200. *Marine Technology Society Journal*, 2016, **50**(5): 74–87
- 50 Wang G, Chen X, Yang S X, Jia P, Yan X Y, Xie J. Subsea crab bounding gait of leg-paddle hybrid driven shoal crablike robot. *Mechatronics*, 2017, **48**: 1–11
- 51 Yang Y, Zhou G, Zhang J Q, Cheng S Y, Fu M Y. Design, modeling and control of a novel amphibious robot with dual-swing-legs propulsion mechanism. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hamburg, Germany: IEEE, 2015. 559–566
- 52 Tang Y C, Qin L, Li X N, Chew C M, Zhu J. A frog-inspired swimming robot based on dielectric elastomer actuators. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vancouver, Canada: IEEE, 2017. 2403–2408
- 53 Fan J Z, Zhang W, Kong P C, Cai H G, Liu G F. Design and dynamic model of a frog-inspired swimming robot powered by pneumatic muscles. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, **30**(5): 1123–1132
- 54 Ayers J, Witting J, Olcott C, Mcgruer N, Massa D. Lobster robots. In: Proceedings of the International Symposium on Aqua Biomechanisms. Tokai, Japan: 2000.
- 55 Boxerbaum A S, Werk P, Quinn R D, Vaidyanathan R. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation: Part I mechanical design for multi-mode mobility. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, USA: IEEE, 2005. 1459–1464
- 56 Liang X, Xu M, Xu L C, Liu P, Ren X S, Kong Z W, et al. The Amphihex: A novel amphibious robot with transformable leg-flipper composite propulsion mechanism. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura-Algarve, Portugal: IEEE, 2012. 3667–3672
- 57 Arienti A, Calisti M, Giorgio-Serchi F, Laschi C. PoseiDRONE: Design of a soft-bodied ROV with crawling, swimming and manipulation ability. In: Proceedings of the OCEANS Conference. San Diego, USA: IEEE, 2013. 1–7
- 58 Calisti M, Corucci F, Arienti A, Laschi C. Dynamics of underwater legged locomotion: Modeling and experiments on an octopus-inspired robot. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, **10**(4): Article No. 046012
- 59 Cianchetti M, Calisti M, Margheri L, Kuba M, Laschi C. Bioinspired locomotion and grasping in water: The soft eight-arm OCTOPUS robot. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, **10**(3): Article No. 035003
- 60 Wu Q X, Yang X C, Wu Y, Zhou Z J, Wang J, Zhang B T, et al. A novel underwater bipedal walking soft robot bio-inspired by the coconut octopus. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, **16**(4): Article No. 046007
- 61 Paschal T, Bell M A, Sperry J, Sieniewicz S, Wood R J, Weaver J C. Design, fabrication, and characterization of an untethered amphibious sea urchin-inspired robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, **4**(4): 3348–3354
- 62 Faudzi A A M, Razif M R M, Endo G, Nabae H, Suzumori K. Soft-amphibious robot using thin and soft McKibben actuator. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Munich, Germany: IEEE, 2017. 981–986
- 63 Zhang Y F, Yang D Z, Yan P N, Zhou P W, Zou J, Gu G Y. Inchworm inspired multimodal soft robots with crawling, climbing, and transitioning locomotion. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, **38**(3): 1806–1819
- 64 Tang Y C, Zhang Q T, Lin G J, Yin J. Switchable adhesion actuator for amphibious climbing soft robot. *Soft Robotics*, 2018, **5**(5): 592–600
- 65 Li L, Xu J W, Li Q Y, Jiang Y Y, Dong X, Ding J N. Small multi-attitude soft amphibious robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, **9**(2): 1067–1073
- 66 Patterson Z J, Sabelhaus A P, Chin K, Hellebrekers T, Majidi C. An untethered brittle star-inspired soft robot for closed-loop underwater locomotion. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Las Vegas, USA: IEEE, 2020. 8758–8764
- 67 Li Y Q, Fish F, Chen Y H, Ren T, Zhou J S. Bio-inspired robotic dog paddling: Kinematic and hydro-dynamic analysis. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2019, **14**(6): Article No. 066008
- 68 Ijspeert A J, Crespi A. Online trajectory generation in an amphibious snake robot using a lamprey-like central pattern generator model. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rome, Italy: IEEE, 2007. 262–268
- 69 Vaquero T S, Daddi G, Thakker R, Paton M, Jasour A, Strub M P, et al. EELS: Autonomous snake-like robot with task and motion planning capabilities for ice world exploration. *Science Robotics*, 2024, **9**(88): Article No. eadh8332
- 70 Crespi A, Karakasiliotis K, Guignard A, Ijspeert A J. Salamandra robotica II: An amphibious robot to study salamander-like swimming and walking gaits. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, **29**(2): 308–320
- 71 Liu C J, Wang J W, Liu Z Y, Zhao Z J, Zhang G Q. Design and movement mechanism analysis of a multiple degree of free-

- dom bionic crocodile robot based on the characteristic of "death roll". *Journal of Field Robotics*, 2024, **41**(8): 2650–2662
- 72 Lin Z L, Zheng W, Zhang J H, Ou W Z, Yang C, Huang H B, et al. Mudskipper-inspired amphibious robotic fish enhances locomotion performance by pectoral-caudal fins coordination. *Cell Reports Physical Science*, 2023, **4**(10): Article No. 101589
- 73 Xiang Y Y, Li B, Li B H, Bao L Y, Sheng W B, Ma Y F, et al. Toward a multifunctional light-driven biomimetic mudskipper-like robot for various application scenarios. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, **14**(17): 20291–20302
- 74 Yamada H, Chigisaki S, Mori M, Takita K, Ogami K, Hirose S. Development of amphibious snake-like robot ACM-R5. In: Proceedings of the 36th International Symposium on Robotics. Tokyo, Japan: Japan Robot Association (JARA), 2005.
- 75 Liu A, Zhang X R, Huang H Z, Xiao F Q, Zhang Z, Cui G M, et al. An intelligent bionic amphibious turtle robot with visual-tactile fusion for dynamic terrain adaptation. *IEEE Transactions on Robotics*, 2025, **41**: 6345–6363
- 76 Kashem S B A, Jawed S, Ahmed J, Qidwai U. Design and implementation of a quadruped amphibious robot using duck feet. *Robotics*, 2019, **8**(3): Article No. 77
- 77 Zheng X W, Wang W, Li L, Xie G M. Artificial lateral line based relative state estimation between an upstream oscillating fin and a downstream robotic fish. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, **16**(1): Article No. 016012
- 78 Luo R L, Li C X, Wang F. Underwater motion target recognition using artificial lateral line system and artificial neural network method. *Ocean Engineering*, 2024, **303**: Article No. 117757
- 79 Bianchi G, Lanzetti L, Mariana D, Cinquemani S. Bioinspired design and experimental validation of an aquatic snake robot. *Biomimetics*, 2024, **9**(2): Article No. 87
- 80 Li C Y, Guo S X, Guo J. Evaluation of obstacle avoidance performance for spherical underwater robots using the ultrasonic sensor. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Guilin, China: IEEE, 2022. 1294–1299
- 81 Guo S X, Pan S W, Shi L W, Guo P, He Y L, Tang K. Visual detection and tracking system for a spherical amphibious robot. *Sensors*, 2017, **17**(4): Article No. 870
- 82 Xing H M, Shi L W, Tang K, Guo S X, Hou X H, Liu Y, et al. Robust RGB-D camera and IMU fusion-based cooperative and relative close-range localization for multiple turtle-inspired amphibious spherical robots. *Journal of Bionic Engineering*, 2019, **16**(3): 442–454
- 83 Li M X, Guo S X, Hirata H, Ishihara H. Design and performance evaluation of an amphibious spherical robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, **64**: 21–34
- 84 An R C, Guo S X, Gu S X, Zheng L. Improvement and evaluation for the stability of mobile spherical underwater robots (SUR III). In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Tianjin, China: IEEE, 2019. 2512–2517
- 85 Liu Y, Guo S X, Shi L W, Xing H M, Hou X H, Liu H K, et al. Multi-sensor fusion based localization system for an amphibious spherical robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Tianjin, China: IEEE, 2019. 2523–2528
- 86 Xing H M, Guo S X, Shi L W, Pan S W, He Y L, Tang K, et al. Kalman filter-based navigation system for the amphibious spherical robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Takamatsu, Japan: IEEE, 2017. 638–643
- 87 Grezmaek J, Graf N, Behr A, Daltorio K. Terrain classification based on sensed leg compliance for amphibious crab robot. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(20): 23308–23316
- 88 Li M X, Guo S X, Guo J, Hirata H, Ishihara H. Development of a biomimetic underwater microrobot for a father-son robot system. *Microsystem Technologies*, 2017, **23**(4): 849–861
- 89 Shi L W, Guo S X, Mao S L, Li M X, Asaka K. Development of a lobster-inspired underwater microrobot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, **10**(1): Article No. 44
- 90 Zhai Y F, Zheng X W, Chao L M, Li S K, Xiong M L, Jia Y X, et al. An interpretable approach to estimate the self-motion in fish-like robots using mode decomposition analysis. *Nature Communications*, 2025, **16**(1): Article No. 3887
- 91 Wang S Y, Xu P, Wang X Y, Zheng J X, Liu X Y, Liu J H, et al. Underwater bionic whisker sensor based on triboelectric nanogenerator for passive vortex perception. *Nano Energy*, 2022, **97**: Article No. 107210
- 92 Zhang S W, Liang X, Xu L C, Xu M. Initial development of a novel amphibious robot with transformable fin-leg composite propulsion mechanisms. *Journal of Bionic Engineering*, 2013, **10**(4): 434–445
- 93 Dudek G, Giguere P, Prahacs C, Saunderson S, Sattar J, Torres-Mendez L A, et al. AQUA: An amphibious autonomous robot. *Computer*, 2007, **40**(1): 46–53
- 94 Zhu P F, Shang K D, Huang Y P, Jiang Z B, Zhou J, Lu X L, et al. Light-driven amphibious mini soft robot mimicking the locomotion gait of inchworm and water strider. *Advanced Intelligent Systems*, 2024, **6**(1): Article No. 2300466
- 95 Zhao W C, Zhang Y, Yang L J, Wang N, Peng L H. Research and implementation of pneumatic amphibious soft bionic robot. *Machines*, 2024, **12**(6): Article No. 393
- 96 Bell M A, Weaver J C, Wood R J. An ambidextrous starfish-inspired exploration and reconnaissance robot (the ASTER-bot). *Soft Robotics*, 2022, **9**(5): 991–1000
- 97 Chen Y H, Yang J J, Zhang X, Feng Y Y, Zeng H, Wang L, et al. Light-driven bimorph soft actuators: Design, fabrication, and properties. *Materials Horizons*, 2021, **8**(3): 728–757
- 98 Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 2015, **521**(7553): 467–475
- 99 Deng Q Y, Li H G, Zhu H J, Yang L, Li W, Yin X B, et al. Spatiotemporal modulation of magnetization in magnetic soft materials. *Advanced Materials*, 2025, **37**(48): Article No. e06342
- 100 Carpi F, Frediani G, Gerboni C, Gemignani J, de Rossi D. Enabling variable-stiffness hand rehabilitation orthoses with dielectric elastomer transducers. *Medical Engineering & Physics*, 2014, **36**(2): 205–211
- 101 Follador M, Tramacere F, Mazzolai B. Dielectric elastomer actuators for octopus inspired suction cups. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, **9**(4): Article No. 046002
- 102 Wegst U G K, Bai H, Saiz E, Tomsia A P, Ritchie R O. Bioinspired structural materials. *Nature Materials*, 2015, **14**(1): 23–36
- 103 Fan J Z, Wang S Q, Wang Y, Li G, Zhao J, Liu G F. Research on frog-inspired swimming robot driven by pneumatic muscles. *Robotica*, 2022, **40**(5): 1527–1537
- 104 Li D F, Wang C, Deng H B, Wei Y R. Motion planning algorithm of a multi-joint snake-like robot based on improved serpenoid curve. *IEEE Access*, 2020, **8**: 8346–8360
- 105 Li D F, Pan Z H, Deng H B, Hu L Y. Adaptive path following controller of a multijoint snake robot based on the improved serpenoid curve. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, **69**(4): 3831–3842
- 106 Wang C, Peng Y B, Li D F, Pan Z H, Deng H B, Li D G, et al. Turning strategy of snake-like robot based on serpenoid curve under cloud assisted smart conditions. *Cluster Computing*, 2019, **22**(S6): 13041–13053
- 107 Xu L S, Cao K, Wei X M, Shi Y G. Dynamics analysis of fluid-structure interaction for a biologically-inspired biped robot running on water. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, **10**(10): Article No. 373

- 108 Vogel A R, Kaipa K N, Krummel G M, Bruck H A, Gupta S K. Design of a compliance assisted quadrupedal amphibious robot. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: IEEE, 2014. 2378–2383
- 109 Luo F Y, Xie G M, Wang Q N, Wang L. Development and gait analysis of five-bar mechanism implemented quadruped amphibious robot. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Montreal, Canada: IEEE, 2010. 633–638
- 110 Klein M A, Boxerbaum A S, Quinn R D, Harkins R, Vaidyanathan R. SeaDog: A rugged mobile robot for surf-zone applications. In: Proceedings of the 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). Rome, Italy: IEEE, 2012. 1335–1340
- 111 Xing H M, Shi L W, Hou X H, Liu Y, Hu Y, Xia D B, et al. Design, modeling and control of a miniature bio-inspired amphibious spherical robot. *Mechatronics*, 2021, **77**: Article No. 102574
- 112 Harkins R, Ward J, Vaidyanathan R, Boxerbaum A X, Quinn R D. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operations: Part II—hardware, control implementation and simulation. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, USA: IEEE, 2005. 1465–1470
- 113 Zhang S W, Zhou Y C, Xu M, Liang X, Liu J M, Yang J. Amphihex-I: Locomotory performance in amphibious environments with specially designed transformable flipper legs. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, **21**(3): 1720–1731
- 114 Ijspeert A J. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. *Neural Networks*, 2008, **21**(4): 642–653
- 115 Golubitsky M, Stewart I, Buono P L, Collins J J. Symmetry in locomotor central pattern generators and animal gaits. *Nature*, 1999, **401**(6754): 693–695
- 116 Matsuo T, Yokoyama T, Ueno D, Ishii K. Biomimetic motion control system based on a CPG for an amphibious multi-link mobile robot. *Journal of Bionic Engineering*, 2008, **5**(1): 91–97
- 117 Ding R, Yu J Z, Yang Q H, Tan M. Dynamic modelling of a CPG-controlled amphibious biomimetic swimming robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, **10**(4): Article No. 199
- 118 Howard D, Eiben A E, Kennedy D F, Mouret J B, Valencia P, Winkler D. Evolving embodied intelligence from materials to machines. *Nature Machine Intelligence*, 2019, **1**(1): 12–19
- 119 Dong H X, Yang H T, Ding S, Li T, Yu H Y. Bioinspired amphibious origami robot with body sensing for multimodal locomotion. *Soft Robotics*, 2022, **9**(6): 1198–1209
- 120 Yao Q F, Meng L H, Zhang Q F, Zhao J, Pajarinen J, Wang X H, et al. Learning-based propulsion control for amphibious quadruped robots with dynamic adaptation to changing environment. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, **8**(12): 7889–7896



**秦博扬** 北京大学先进制造与机器人学院博士研究生。2025 年获得北京理工大学机械电子工程专业学士学位。主要研究方向为水陆两栖跨介质机器人。E-mail: byqin25@stu.pku.edu.cn  
(**QIN Bo-Yang** Ph.D. candidate at the School of Advanced Manufac-

turing and Robotics, Peking University. He received his bachelor degree in mechatronic engineering from Beijing Institute of Technology in 2025. His main research interest is amphibious cross-medium robots.)



**李磊** 北京大学海洋研究院博士后。2024 年获得北京航空航天大学博士学位。主要研究方向为仿生机器人, 软体机器人及智能机器人。

E-mail: leili\_@pku.edu.cn

(**LI Lei** Postdoctor at the Institute of Ocean Research, Peking University. He received his Ph.D. degree from Beihang University in 2024. His research interests include bionic robots, soft robots, and intelligent robots.)



**孔诗涵** 北京大学先进制造与机器人学院助理研究员。2021 年获得中国科学院大学博士学位。主要研究方向为先进机器人控制, 水下智能机器人。

E-mail: kongshihan@pku.edu.cn

(**KONG Shi-Han** Assistant researcher at the School of Advanced Manufacturing and Robotics, Peking University. He received his Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2021. His research interests include advanced robot control and underwater intelligent robots.)



**喻俊志** 北京大学先进制造与机器人学院博雅特聘教授。2004 年获得中国科学院研究生院博士学位。主要研究方向为智能机器人, 智能控制, 具身智能。本文通信作者。

E-mail: junzhi.yu@ia.ac.cn

(**YU Jun-Zhi** Boya distinguished professor at the School of Advanced Manufacturing and Robotics, Peking University. He received his Ph.D. degree from Graduate School of Chinese Academy of Sciences in 2004. His research interests include intelligent robots, intelligent control, and embodied intelligence. Corresponding author of this paper.)