



## 仿生机器鱼步态控制及闭环运动控制方法综述

王文谦 马鹏磊 李广浩 许传新 姚兵 刘贵杰

### Review of gait control and closed-loop motion control methods for bionic robotic fish

WANG Wenqian, MA Penglei, LI Guanghao, XU Chuanxin, YAO Bing, LIU Guijie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03233>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 腹部作业型水下机器人控制系统研制

Development of control system in abdominal operating ROV

中国舰船研究. 2017, 12(2): 124-132 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3185.2017.02.016>

#### 船舶在波浪上纵向运动与控制研究综述

Review of longitudinal motion and controls of ships on waves

中国舰船研究. 2020, 15(1): 1-12, 47 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01751>

#### 水下安全检测与作业型机器人控制系统

Control system of ROV for underwater safety inspection and operation

中国舰船研究. 2018, 13(6): 113-119 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01167>

#### 多自主式水下机器人的路径规划和控制技术研究综述

A review of path planning and cooperative control for MAUV systems

中国舰船研究. 2018, 13(6): 58-65 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01028>

#### 基于GSE平台的蒸汽试验系统边界的动态控制仿真

Dynamic control simulation of steam test system boundary based on GSE platform

中国舰船研究. 2019, 14(1): 120-124, 143 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01094>

#### 船舶运输安全保障下的智能船舶运动控制策略

The motion control strategy for intelligent ships based on ship transportation safeguard

中国舰船研究. 2019, 14(S1): 1-6 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01634>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03233>

期刊网址: [www.ship-research.com](http://www.ship-research.com)

引用格式: 王文谦, 马鹏磊, 李广浩, 等. 仿生机器鱼步态控制及闭环运动控制方法综述 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(1): 29–45.

WANG W Q, MA P L, LI G H, et al. Review of gait control and closed-loop motion control methods for bionic robotic fish [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(1): 29–45 (in Chinese).

# 仿生机器鱼步态控制及闭环运动控制方法综述



扫码阅读全文

王文谦, 马鹏磊, 李广浩, 许传新, 姚兵, 刘贵杰\*

中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266404

**摘要:** 鱼类所具有的推进效率高、机动性强、环境扰动小等优点引发了国内外学者对仿生机器鱼的研究。底层步态控制方法和闭环运动控制方法是当前机器鱼控制研究的两大热点。按照推进模式的分类方法概述各类机器鱼的样机研制情况以及其性能优劣, 介绍机器鱼的推进机理及其水动力学研究进展, 进而重点探讨轨迹逼近方法和中枢模式发生器这2种底层步态控制思路, 综述机器鱼的典型闭环运动控制方法。中枢模式发生器具有更强的灵活性、稳定性和可操作性, 易于引入反馈项而实现闭环控制, 在机器鱼底层步态控制中占主导地位。针对机器鱼的显著特点改进后的基于学习的控制方法与多种方法相结合后的混合控制方法具有更为广阔的发展前景, 符合仿生机器鱼智能化的发展方向。根据工作条件和运动要求建立合理的步态控制系统以及准确高效的闭环运动控制系统可提高机器鱼的整体性能。

**关键词:** 仿生机器鱼; 动力学建模; 步态控制; 闭环运动控制

**中图分类号:** U664.82; U674.941

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.03233

## Review of gait control and closed-loop motion control methods for bionic robotic fish

WANG Wenqian, MA Penglei, LI Guanghao, XU Chuanxin, YAO Bing, LIU Guijie\*

College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China

**Abstract:** The advantages of fish such as high propulsion efficiency, strong maneuverability and low environmental disturbance have sparked extensive research on bionic robotic fish by both domestic and international scholars. The basic-level gait control method and closed-loop motion control method are currently two hot topics in research on robotic fish control. According to the propulsion mode classification method, this paper summarizes the prototype development and performance of various robotic fish, introduces the research progress of the propulsion mechanisms and hydrodynamics of robotic fish, focuses on two basic gait control ideas, namely the trajectory approximation method and central pattern generator (CPG), and summarizes the typical closed-loop motion control method. The CPG method has stronger flexibility, stability and operability, and it is easy to introduce feedback items and achieve closed-loop control, for which it plays a leading role in the basic gait control of robotic fish; while the improved learning-based control method and hybrid control method combining multiple methods based on the significant characteristics of robotic fish have broader development prospects, which is in line with the development direction of intelligent biomimetic robotic fish. Establishing a reasonable gait control system and an accurate and efficient closed-loop motion control system based on working conditions and motion requirements is the key to improving the overall performance of robotic fish.

**Key words:** bionic robotic fish; dynamic modeling; gait control; closed-loop motion control

收稿日期: 2022–12–29 修回日期: 2023–06–01 网络首发时间: 2023–12–22 09:11

基金项目: 崂山实验室科技创新项目资助 (LSKJ202203500); 中国博士后科学基金资助项目 (2021M693020)

作者简介: 王文谦, 男, 1999年生, 硕士生。研究方向: 仿生机器鱼水动力性能及控制。E-mail: 1694260566@qq.com

马鹏磊, 男, 1991年生, 博士, 副教授。研究方向: 振荡翼水动力特性。E-mail: mpldu@163.com

李广浩, 男, 1995年生, 博士。研究方向: 水下机器人技术。E-mail: tonny157@163.com

刘贵杰, 男, 1968年生, 博士, 教授。研究方向: 水下机器人, 水下仿生学, 海洋机电装备, 设备状态监测与故障诊断。E-mail: liuguijie@ouc.edu.cn

\*通信作者: 刘贵杰

## 0 引言

水下航行器是海洋开发及水下活动的重要载体,在海洋环境研究、海洋矿产勘探、海洋设备维修等军民领域具有广阔的应用前景和巨大的潜在价值。传统的水下航行器多采用螺旋桨推进方式。螺旋桨推进器技术成熟、应用可靠,可以满足对于水下推进的诸多要求,但其在低速姿态调整工况下工作效率低、稳定性差,且在推进过程中会产生较大的噪声和明显的尾迹。这些不足之处极大地限制了螺旋桨推进器的应用场景和技术进步,因此,人们开始研究新的推进方式。

鱼类在水中有着优异的机动能力,其可观的推进效率和出色的隐蔽性启发了人们对仿生机器鱼的研究。随着新型致动机构的研制、特种材料的应用、动力学建模理论的完善以及底层步态控制方法和闭环运动控制方法的提出与改进,仿生机器鱼在短短几十年间得到了迅猛发展<sup>[1-2]</sup>。自 1994 年第 1 只仿生机器鱼 RoboTuna<sup>[3]</sup>问世至今,融合了各项技术的各类仿生机器鱼层出不穷,呈现出积极的发展趋势和广阔的应用前景。本文将从机器鱼的运动模式、运动学和水动力学研究,以及底层步态控制方法与闭环运动控制方法这 4 个方面展开论述,对重要的科学理论和近年来的先进研究成果进行梳理与提炼,并对机器鱼的未来发展趋势和发展方向做出展望。

## 1 基于不同运动模式的仿生机器鱼设计

关于鱼类的推进模式,最为广泛认可的分类方式由 Breder<sup>[4]</sup>和 Webb<sup>[5]</sup>整理提出。该分类方式将鱼类根据推进器官的不同划分为了身体/尾鳍(body and/or caudal fin, BCF)推进模式和中央鳍/对鳍(median and/or paired fin, MPF)推进模式 2 大类,其中,BCF 模式的鱼类约占总量的 85%,MPF 模式的鱼类约占 15%。

整体而言,相比 MPF 模式,BCF 模式的鱼类游泳速度更高,在层流情况下性能更优,但机动性稍差;而 MPF 模式则有着更高的机动性,在湍流情况下其稳定性也较强,但推进速度略逊一筹。此外,根据运动方式的不同,这 2 种模式又可以分为波动模式和摆动模式<sup>[4]</sup>。波动模式通常表现为沿推进方向至少有一个波的反复传递,而摆动模式则主要是身体或鳍的振动,通常表现出不足半个波或是没有明显的波的形式。受仿生学的影响,上述对于鱼类运动模式的分类方式同样适用于机器鱼。

值得一提的是,在同一个仿生机器鱼上通常不止一种推进模式或是运动方式,而是多个种类的融合。例如,采用 BCF 波动推进的机器鱼上可能会有摆动胸鳍的参与,用以实现姿态调整、辅助推进等作用。

### 1.1 BCF 模式

BCF 推进模式<sup>[6]</sup>主要有鳗鲡(Anguilliform)模式、亚鲹科(Subcarangiform)模式、鲹科(Carangiform)模式、金枪鱼(Thunniform)模式和尾鳍摆动(Ostraciiform)模式。由鳗鲡模式到尾鳍摆动模式,其运动方式也从波动模式逐渐向摆动模式过渡。通常认为前 3 种模式属于波动模式,后 2 种模式属于摆动模式。本节将介绍 BCF 模式的典型仿生机器鱼样机及其运动特征。

Nguyen 等<sup>[7]</sup>提出了一种新型仿鳗鱼机器鱼设计,如图 1 所示。该机器鱼采用 4 对软体气动致动器,通过按顺序向致动器输入设定相位的脉冲信号来驱动鱼体产生仿鳗鱼运动的正弦波。以鳗鲡模式推进的机器鱼通常需要大量的运动执行机构来实现其近乎全身的大幅度波动,这种超冗余的大波幅设计很大程度上提高了机器鱼的机动性,但同时也导致其水动力效率和运动速度较低。

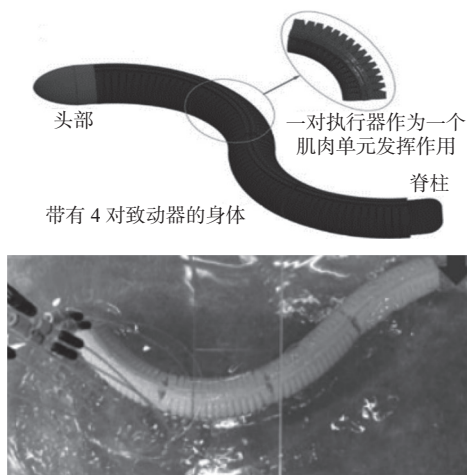


图 1 鳗鲡模式机器鱼<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Anguilliform robotic fish<sup>[7]</sup>

Muralidharan 等<sup>[8]</sup>设计了一款由形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)弹簧致动器驱动的亚鲹科模式机器鱼,如图 2 所示。该 SMA 弹簧设计能够实现双向形状的记忆效应,增强了机器鱼的可操作性。亚鲹科模式机器鱼的前半部分多采用刚性设计,主要通过身体后半部的波动来产生推进力,相比鳗鲡模式的机器鱼,其通常拥有更高的推进速度,但机动性较差。鲹科模式与亚鲹科模式类似,不同之处在于鲹科模式的机器鱼通常只通过身体后 1/3 的部分产生推力。



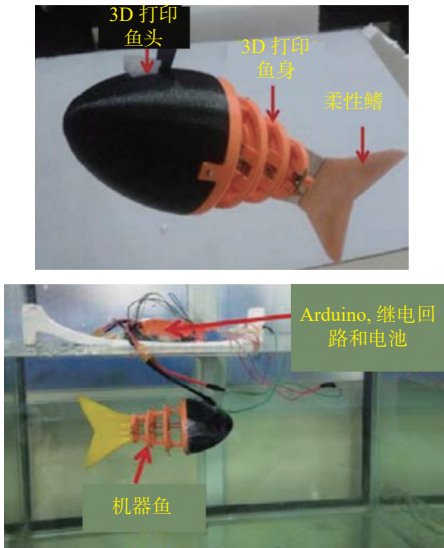


图 2 亚鲹科模式机器鱼<sup>[8]</sup>  
Fig. 2 Subcarangiform robotic fish<sup>[8]</sup>

Du 等<sup>[9]</sup>研制了一款仿金枪鱼机器鱼,如图 3 所示。该机器鱼有一个尾鳍和一对胸鳍,通过一种创新设计的双电机驱动机构来带动尾鳍实现类似于金枪鱼的横向波动,并通过胸鳍和浮力调节结构实现多自由度的运动。Matta 等<sup>[10]</sup>通过试验研究了方形尾鳍、圆形尾鳍和后掠翼形尾鳍这 3 种尾鳍形状对金枪鱼模式机器鱼推进性能的影响,并分析了可能的成因。金枪鱼模式机器鱼一般由尾鳍和尾鳍与鱼体之间的连接短柄(尾柄)来实现推进,其中尾鳍约提供超过 90% 的推进力,能够长时间的保持高速游动状态,但比较依赖胸鳍等辅助装置来提高机动性。整体而言,金枪鱼模式在 BCF 运动模式中推进效率最高。

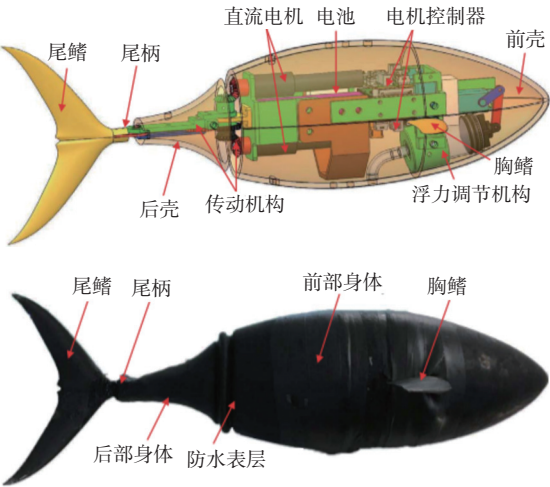


图 3 金枪鱼模式机器鱼<sup>[9]</sup>  
Fig. 3 Thunniform robotic fish<sup>[9]</sup>

Ji 等<sup>[11]</sup>设计了一款尾鳍摆动模式的仿生机器鱼(图 4),并在该机器鱼上实现了目标探测与追踪。该机器鱼的尾鳍由一个伺服电机驱动,可以实现变频率、变摆幅的灵活摆动。尾鳍摆动模式

机器鱼的身体部分多采用刚性设计,只依靠末端刚性尾鳍的摆动来实现推进,具有很强的稳定性,但推进速度和推进效率较低。

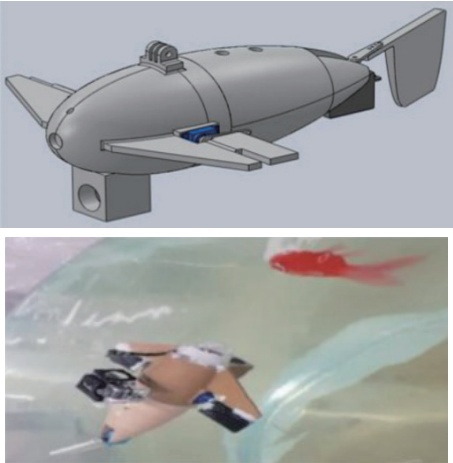


图 4 尾鳍摆动模式机器鱼<sup>[11]</sup>  
Fig. 4 Ostraciiform robotic fish<sup>[11]</sup>

1.2 MPF 模式

MPF 推进模式<sup>[6]</sup>主要包括鳗科模式(Rajiform)、裸背鳗科模式(Gymnotiform)、弓鳍目模式(Amiiform)和隆头鱼科模式(Labriform)。通常,将前 3 种划分为波动模式,第 4 种为摆动模式。相比 BCF 模式,采用 MPF 推进模式的机器鱼在结构、材料、控制等方面通常更为复杂,因此目前针对此类机器鱼的研究较少。本节将介绍 MPF 模式的典型仿生机器鱼样机及其运动特征。

典型的以鳗科模式运动的鱼类——蝠鲼,其扑翼的变形包括 2 种:主动变形和被动(流固耦合)变形。Liu 等<sup>[12]</sup>考虑到刚性扑翼对被动变形的限制,设计了由轻质聚乳酸、硅橡胶和碳纤维这 3 层不同材料组成的两自由度扑翼结构,并对蝠鲼机器鱼进行了流体力学数值仿真分析和试验测试。Zhou 等<sup>[13]</sup>使用 6 条由电机驱动的连杆带动两侧胸鳍,实现了变参数波动运动,用以满足机器鱼的前后游动、升沉和转向等运动要求,并针对仿生滑行运动进行了相应的控制策略研究,以起到节约巡航能源的作用。如图 5 所示,鳗科模式机器鱼通常具有一对翼状胸鳍,该胸鳍由附着于身体上的鳍条等驱动部件带动,通过调节驱动部件的运动参数来控制胸鳍波动的频率、摆幅和波形等参量,进而驱动机器鱼本体以实现稳定的多自由度运动。鳗科模式整体上具有中等的机动性和较低的运动速度。

Liu 等<sup>[14]</sup>研制了一款仿美洲刀鱼的机器鱼,主要以正弦振荡波拟合刀鱼的波动鳍曲面,对机器鱼的前游、后游和悬停等运动进行了试验,并通



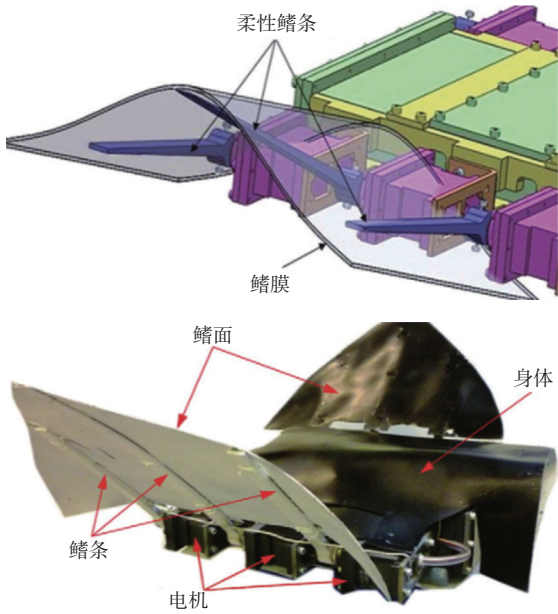


图 5 鳐科模式机器鱼<sup>[13]</sup>  
Fig. 5 Rajiform robotic fish<sup>[13]</sup>

过粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术对涡流场展开研究, 分析了各项运动的成因。裸背鳗科模式机器鱼 (图 6) 一般需要更多的鳍条来驱动胸腹部的长鳍从而产生灵活可控的波形, 以使其能够在不转动方向的条件下平稳地实现前后运动方向的转变, 有着出色的机动性, 但运动速度中等。弓鳍目模式机器鱼与裸背鳗科模式机器鱼类似, 不过其波动长鳍设计在背部, 导致在竖直平面内常态推力方向存在明显差异。这 2 种模式在调配重、浮力和重、浮心时多有不同。

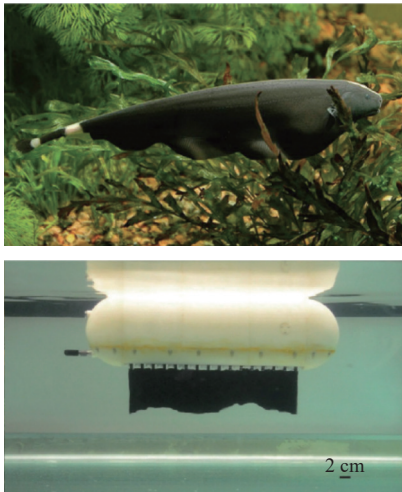


图 6 裸背鳗科模式机器鱼<sup>[14]</sup>  
Fig. 6 Gymnotiform robotic fish<sup>[14]</sup>

Zhong 等<sup>[15]</sup>设计了一种有一对胸鳍和一个尾鳍的机器鱼, 胸鳍有 2 个自由度, 能够实现推进和转弯等运动。当单靠尾鳍推进时, 推进速度约为胸鳍推进的 2.54 倍, 但使用胸鳍推进时的转弯半径相比不使用胸鳍的情况可减小约 60%。受胸鳍

大小、活动范围等条件的限制, 胸鳍的推进能力有限, 单纯依靠胸鳍产生推力的案例较少且效果不甚理想, 所以隆头鱼科模式机器鱼 (图 7) 通常会设计一个尾鳍来弥补胸鳍推力的不足, 不过该胸鳍对于提高机器鱼整体的机动性和稳定性均有很大的作用。

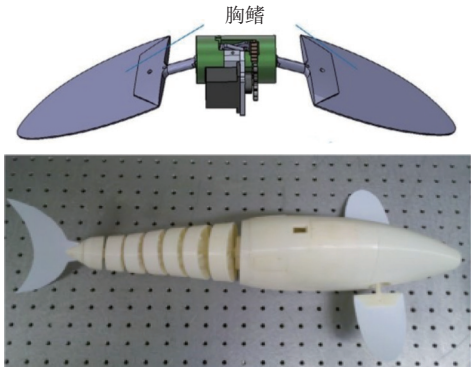


图 7 隆头鱼科模式机器鱼<sup>[15]</sup>  
Fig. 7 Labriform robotic fish<sup>[15]</sup>

## 2 仿生推进的运动学与水动力学研究

仿生推进的运动学与水动力学研究可以为机器鱼控制系统中运动策略的提出、系统参数的整定、被控参数的调节等提供依据。几十年来, 国内外学者采用理论分析、实验测试和数值仿真等研究方法对仿生推进的运动学与水动力学展开研究, 已取得丰硕的成果。研究内容主要包括: 1) 对运动模式、运动原理的研究; 2) 对水动力性能、推进机理的研究; 3) 对水动力学模型的研究。

### 2.1 对运动模式、运动原理的研究

通过采用多电机带动串、并联连杆从而产生预期的波动或者摆动运动是模拟鱼类运动模式最为简便、直接的方法。连杆机构易于控制, 有着深厚的研究基础, 在机器鱼仿生驱动结构中应用较为广泛。

随着对真实鱼类及仿生机器鱼的长期研究, 许多学者注意到真实鱼类灵活、高效的运动控制能力相比僵硬的连杆驱动结构具有无可比拟的优势, 因而关于鱼类运动模式及运动原理的研究成为仿生推进运动学的研究重点。

Shadwick 等<sup>[16]</sup>研究了鱼类轴向起伏运动中肌肉与身体运动学之间的关系。Flammang 等<sup>[17]</sup>应用高速摄像和肌电图 (electromyogram, EMG) 技术, 研究蓝鳃太阳鱼实现反向推进所需的运动形态和肌肉活动情况, 强调了尾鳍、胸鳍、背鳍的相关肌群对鳍面形状的控制作用。鱼类红肌在稳定游动的过程中用于弯曲鱼体脊柱, 进而实现身体

的摆动推进。受鱼类尾鳍驱动方式的启发, Chen 等<sup>[18]</sup> 选用离子聚合物-金属复合材料(ionic polymer metal composites, IPMC)作为仿生尾鳍的致动材料, 并结合 IPMC 驱动动力学建立了仿生尾鳍的动力学模型。Wang 等<sup>[19]</sup> 研究了墨鱼鳍的三维肌肉结构并据此设计了一种基于 SMA 致动线-塑料基体-硅胶表皮复合结构的仿生鳍, 由该仿生鳍推动的机器鱼能够达到 112 mm/s 的游动速度。值得注意的是, 虽然目前基于 SMA, IPMC 等新型材料的驱动方式所表现的力学性能不尽人意, 但其在运动形式和致动方式方面与真实的鱼类达到了较高的相似度, 也更能体现仿生学的思想<sup>[20]</sup>。随着对相关致动材料力学驱动特性的不断完善, 这类驱动方式的推进性能也将得到相应的提升。

## 2.2 对水动力学性能、推进机理的研究

对水动力学性能及水动力产生机理的研究通常需要从力学特性测量和流场分析的角度入手。受高速摄像技术、激光发生技术等相关科技发展水平的限制, 早期关于仿生推进流场环境的实验研究多停留在定性层面。随着数字粒子图像测速(digital particle image velocimetry, DPIV)技术的发展, 针对仿生推进的周围压力场、速度场、涡旋场等流场环境的定量研究得以广泛开展<sup>[21]</sup>。

Meng 等<sup>[22]</sup> 利用一种悬臂微力测量机构, 分析了由宏观纤维复合材料(macro fiber composites, MFC)驱动机器鱼的游动状态与推力之间的动态变化情况, 建立了振荡周期与推力以及阻力之间的映射关系, 并根据压力分布情况揭示了流体-结构的相互作用机理。Hawkins 等<sup>[23]</sup> 使用 DPIV 对具有典型细长带状鳍的黑魔鬼刀鱼在转弯过程中的流场情况进行了研究, 发现在大幅度转弯和小幅度转弯过程中所产生的成对反向涡旋分别比稳定游动过程中产生的涡旋大 190% 和 84%, 并进一步强调了带状鳍的波长、频率和波速在快速转动中的作用。Sun 等<sup>[24]</sup> 研究了机器鱼中间鳍的竖立/折叠时间和展开面积对加速性能的影响, 并应用 DPIV 分析了竖立背鳍和折叠背鳍的涡旋强度。Ren 等<sup>[25]</sup> 研制了一种仿生波动尾鳍, 并针对尾鳍后的竖直、水平平面进行了 DPIV 实验, 结果表明, 波动相位差的改变引起了明显的射流和涡流的角度变化以及尾涡脱落位置的变化。

数值仿真方法从理论上讲能够模拟各种理想条件, 弥补实验研究的不足, 但通常需要耗费大量的计算资源来求解 Navier-Stokes 方程。近年来, 随着计算机算力的不断提高和 CFD 相关算法

及软件的持续优化, 数值仿真技术在准确度、求解速度等方面均得到了大幅提升, 被广泛应用于仿生推进水动力学特性和推进机理等研究中。

Zhao 等<sup>[26]</sup> 将鱼体和带状波动鳍简化为零厚度矩形板, 研究了鳍面波动和鱼体波动之间的相位差对整体水动力性能的影响。Shirgaonkar 等<sup>[27]</sup> 采用浸入边界法对仿生波动长鳍的周围流场分布进行数值分析, 说明了水动力产生的主要机制是流线型的中心射流和与之相关的附加涡环。Tian 等<sup>[28]</sup> 针对机器鱼的运动控制参数难以直接整定的问题, 开发了一个基于水动力学-运动学强耦合方法的计算流体力学仿真平台, 并通过对比实际机器鱼与仿真机器鱼之间的轨迹, 验证了仿真平台的有效性。

## 2.3 对水动力学模型的研究

英国物理学家 Taylor<sup>[29]</sup> 于 1952 年提出了第 1 个力学解析模型——抗力理论。该理论是采用定常流理论的方法去分析非定常的游动现象, 认为水动力主要包括纵向表面摩擦力和横向阻力, 着重于黏性力的影响, 忽略了流体惯性力的作用。

Lighthill<sup>[30]</sup> 提出的细长体理论认为鱼类的运动属于高雷诺数下的情况, 并假设雷诺数为无穷大。该理论考虑了鱼类游动的非定常流动特性, 指出了细长型鱼类能够实现高效率推进的条件, 将其惯性力作为鱼类小波幅推进的绝对主导因素, 根据由鱼体波动引起的动量变化求解了其产生的推力。Lighthill<sup>[31]</sup> 应用细长体理论对鲹科推进模式和金枪鱼推进模式进行研究, 分析了规则运动和不规则运动这 2 种运动情形, 并在细长体理论的基础上提出了大摆幅细长体理论。该理论适用于大振幅波动情况, 拓展了理论的适用范围。Lighthill 的研究极大地推动了仿生推进的研究进程, 至今仍能为仿生机器鱼的建模提供重要的参考与指导, 但细长体理论和大摆幅细长体理论均忽略了尾部涡流对推进性能的影响, 造成了一定的局限性。

1961 年, Wu<sup>[32]</sup> 应用二维势流理论, 将游动的鱼体简化为柔性起伏的二维薄板, 采用线性化方法研究了其推进性能, 并提出了二维波动板理论。该理论定义了鱼体波动和尾鳍摆动所产生的漩涡结构, 能够求解鱼类游动的推力、功率和效率等参数, 但因在推导过程中忽略了流体的黏性, 因此多用于高雷诺数下的情形。Cheng 等<sup>[33]</sup> 针对任意展弦比及任意平面形状的波动板展开分析, 采用半解析半数值的方法解出了三维非定常线性解, 然后将二维波动板理论推广至三维, 提



出了三维波动板理论,揭示了三维波动对推进性能及推进效率的影响机理,并划分了细长体理论和二维波动板理论的应用场景。三维波动板理论与细长体理论所表述的定性规律相契合,从很大程度上验证了理论的正确性,被广泛应用于 MPF 波动模式的水动力研究中。除上述理论以外,还有一些理论,例如作动盘理论<sup>[34]</sup>、翼型理论<sup>[35]</sup>等也对鱼类游动的运动学以及水动力学研究做出了贡献。

基于以上解析理论及其改进模型,许多学者针对机器鱼的水动力学展开了研究。Hu 等<sup>[36]</sup>设计了一种基于解耦杠杆机构的微推力测量系统,测得了由 MFC 驱动机器鱼在最大翼尖振荡速度情况下的平均推力,并使用细长体理论对机器鱼在相同工况下的平均推力进行了估算,结果显示两者的结果一致,验证了测力装置的准确性。Blake<sup>[37]</sup>应用作动盘理论,对以典型 MPF 低频大波幅模式推进的尼罗河魔鬼鱼和以高频小波幅模式推进的海马的柔性长鳍的推进性能进行了研究,结果显示前者的推进效率可以达到后者的 2 倍。Jiang 等<sup>[38]</sup>应用大摆幅细长体理论与解耦自然正交互补矩阵相结合,建立了柔性机器鱼的游动模型,验证了非线性共振效应的存在,并讨论了共振现象的潜在影响因素。

上述分析理论对鱼类运动的水动力学给予了定性与定量的描述,在仿生推进的性能及机理研究和仿生鱼水动力学模型的建立等方面做出了诸多贡献,具有很大的理论价值和指导意义。但是,这些理论模型均是基于诸多的假设及简化前提推导而来,与鱼类实际的游动存在较大差异,这在很大程度上影响了模型参数的准确性,限制了理论的应用范围。

随着数据驱动、比例平均等方法的提出与发展,水动力学参数难以确定的问题逐渐得到解决。数据驱动方法对于解决内部过程、机理不明的系统的建模问题具有显著优势。该方法能够根据复杂系统中通过实验等方式测得的大量输入输出数据,应用神经网络、支持向量机等实现预测逼近功能,经过反复训练学习,最终得到输入输出变量之间的数学关系。Yu 等<sup>[39]</sup>针对具有不规则几何轮廓和众多非均匀水动力参数的多关节机器鱼,提出了一种基于数据驱动的水动力学建模方法。其首先应用莫里森方程和条带法建立多关节机器鱼的显式动力学模型,推导了机器鱼的显式动力学方程,然后通过实验采集了机器鱼的运动数据并采用 Matlab 非线性灰箱辨识工具箱实现了对水动力学参数的识别,最后通过仿真和

实验的方式验证了模型的准确性。Verma 等<sup>[40]</sup>开发了一种用于双连杆机器鱼运动控制的数据辅助动力学建模方法,数据辅助模型中包含有推力延迟和摆幅-推力的非线性映射这 2 个重要因素,对于提高控制器的性能十分关键。Wang 等<sup>[41]</sup>在经典平均法的基础上,通过对动力学模型中的强迫项进行适当的比例缩放,提出了一种比例平均法,用于构建鳗科模式仿生机器鱼的水动力学模型,并进行了大量相关实验,结果证明了该平均方法的有效性。应用该比例平均法建立的模型不仅具有高保真度,而且易于分析和控制设计。

### 3 仿生机器鱼底层步态控制方法

目前,对于机器鱼的运动控制多采用底层步态控制与闭环运动控制方法相结合的方式,具体来说就是先采用合适的步态生成方法实现机器鱼的底层步态控制,然后选用有效的闭环算法实现机器鱼控制系统的完整闭环。本节将对机器鱼的底层步态控制方法展开介绍,而有关闭环运动控制方法的相关内容则在下节予以介绍。

仿生机器鱼能够满足预定运动要求的关键之一就是采用有效的步态控制方法使仿生机器鱼实现类似于真实鱼类的节律性运动。随着国内外专家学者对仿生机器鱼的运动学及水动力学研究的不断深入,机器鱼建模的相关问题逐步得到解决,但大部分机器鱼的水动力建模仍存在模型精度不够高、建模过程复杂繁琐以及建模方法通用性不强等问题,因此基于模型的控制方法更多的是基于机器鱼的运动学模型,典型的代表是轨迹逼近方法。

除传统的基于运动学的方法外,周期信号生成器和中枢模式发生器(central pattern generator, CPG)也是机器鱼节律性摆动/波动的步态控制方法的主要组成部分。其中,周期信号生成器主要通过设定多个周期性输入信号之间的相位差来使机器鱼各致动关节产生类似于真实鱼类的运动输出。该方法原理简单且易于实现,但实际调控起来较为僵硬,灵活性不足,应用前景有限。因此,本节将不单独介绍周期信号生成器,而是将轨迹逼近方法和 CPG 作为论述的重点,最后给出 3 种底层步态控制方法的对比分析。

#### 3.1 轨迹逼近方法

轨迹逼近方法的思想是将鱼类游动的连续曲线离散化,随后根据离散点的坐标来设计机器鱼鱼体的关节位置,接着根据鱼类每一时刻游动的体波数据形成运动参数集,以确定机器鱼各个关



节的运动情况, 最终实现对真实鱼类游动行为的逼近。

Lighthill<sup>[42]</sup> 采用幅值受包络系数控制的正弦波描述鱼类的游动规律, 提出了 Lighthill 行波方程:

$$y(x, t) = (A_1x + A_2x^2)\sin(kx - \omega_0t) \quad (1)$$

式中:  $y(x, t)$  为鱼体横向位移;  $x$  为沿鱼体轴向的坐标值;  $t$  为时间;  $k = 2\pi/\lambda$ , 其中  $\lambda$  为鱼体行波波长;  $A_1$  为一次波幅包络系数;  $A_2$  为二次波幅包络系数;  $\omega_0$  为波动角频率。

Lighthill 行波方程被广泛用于以典型 BCF 模式运动的仿鲹科机器鱼, 机器鱼鱼体通过若干串联关节实现了对鲹科鱼类游动方式的逼近。因机器鱼头部通常被设定为刚性摆动, 为了消除其对机器鱼稳定游动的影响, Yu 等<sup>[43]</sup> 在 Lighthill 行波方程的基础上进行了改进, 也可以通过调节比例因子的大小来实现更多的运动模式, 得到修正后的鱼体横向位移方程如式(2)所示。将该方程离散化, 即可建立仿鲹科机器鱼各关节不同时刻的运动参数集。

$$\tilde{y}(x, t) = (A_1x + A_2x^2)\sin(kx - \omega_0t) + A_3A_1x\sin\omega_0t \quad (2)$$

式中:  $\tilde{y}(x, t)$  为鱼体横向位移;  $A_3$  为控制波动幅度的比例因子。

以 MPF 模式运动的刀鱼主要是依靠身体上附着的波动鳍来实现推进运动, 且鳍面的波动幅度是越向外侧越大, 所以其与仿鲹科机器鱼所采用的串联关节的逼近方式不同, 是通过调节多个并联关节横向切面内的角位移差来实现对轴向行波推进模式的逼近。

Shirgaonkar 等<sup>[27]</sup> 分析了刀鱼的运动方式, 并将其简化、抽象, 建立了 MPF 波动推进的刀鱼鱼鳍的理想运动方程。

$$\theta(x, t) = \theta_{\max} \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - ft \right) \quad (3)$$

式中:  $\theta(x, t)$  为理想摆杆的偏转角度;  $\theta_{\max}$  为转动关节的最大角偏转量;  $f$  为振动频率。

轨迹逼近方法是在运动学的角度上实现对机器鱼的控制, 以离散的关节去机械地逼近真实鱼类游动的一种方式, 其通过运动参数集的建立, 可以简单、便捷地控制机器鱼的游动。但是, 不同时刻离散点之间的运动过渡可能不平稳, 这会引起较大的瞬时加速度和瞬时转矩的产生, 对关节的结构和驱动电机的性能均有一定的要求, 也限制了控制性能和运动效率的提升。同时, 运动关节的数量对机器鱼的最终性能有着较大的影响, 较少的关节量难以很好地拟合真实鱼类的运

动形式, 所以在客观限制条件内, 通常会使用更多的关节来尽可能地逼近鱼类的游动轨迹, 但这又会导致运动参数集的维度增大, 计算过程变长, 因此轨迹逼近方法在一定程度上限制了机器鱼的结构设计。

### 3.2 CPG

随着生物学家对生物节律性行为研究的不断深入, 仿照生物节律性运动原理的基于 CPG 的步态控制方法吸引了许多学者的注意。CPG 就像人工脊髓, 通常由若干耦合的神经元构成, 可以在不接收高级神经中枢指令和反馈信号输入的情况下, 自发地持续产生激励信号以控制执行机构做出节律性的运动, 也可以在上层反馈信号的控制下调整内部参数, 相应地改变节律性运动行为。这种特性完全符合机器鱼对于周期节律性振荡的步态控制要求, 并且也为实现闭环运动控制提供了可能, 因此, 基于 CPG 的控制方法得到越来越多的应用。

CPG 模型一般不具有通用性, 需要针对具体的运动控制要求来设计相应的 CPG 结构和模型。CPG 单元之间的耦合方式是构建 CPG 网络所需要考虑的核心内容之一。CPG 拓扑网络结构主要可以分为链状和网状 2 种, 其中链状结构多用于串联的各神经元之间存在明显确定相位关系的情况, 例如仿生鳗鱼; 而网状结构多用于多个神经元之间存在复杂耦合协调关系的情况, 如胸鳍尾鳍协调推进的仿生机器鱼; 对于更加复杂的控制要求, 则通常需要两种结构的结合。另外, CPG 模型对控制系统的适用情况和性能有着至关重要的影响, 基于 CPG 原理的模型<sup>[44]</sup> 包括生物物理模型、联结模型、振荡器模型和神经机理模型。在仿生机器鱼领域, 振荡器模型凭借其较为简易的模型结构、较高的可调控性、较低的数据处理要求等优点脱颖而出。典型的振荡器模型主要包括 Hopf 谐波振荡器、Ijspeert 相位振荡器等非线性振荡器模型和 Matsuoka 递归神经元振荡器、Kimura 递归神经元振荡器等神经振荡器模型。

#### 3.2.1 Hopf 振荡器

Hopf 振荡器<sup>[45]</sup> 具有一个稳定的极限环, 即对于状态空间中的任意非零状态, 其稳态输出最终都会收敛至极限环上, 产生稳定的谐波振荡信号。Hopf 谐波振荡器结构简单、参数较少且每个参数都可以独立调节, 具有明确的物理含义, 与输出特性之间存在映射关系, 易于调节输出信号。其数学模型由下面的微分方程定义:

$$\begin{cases} \dot{p} = \alpha[\mu^2 - (p^2 + q^2)]p - \omega q \\ \dot{q} = \beta[\mu^2 - (p^2 + q^2)]q + \omega p \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $p, q$  为振荡器的状态变量;  $\dot{p}, \dot{q}$  为状态变量对时间的微分;  $\omega$  为固有振荡的频率;  $\mu$  为振荡的稳态振幅;  $\alpha$  和  $\beta$  为控制状态变量收敛至以  $\mu$  为半径的极限环的速度。

Hopf 振荡器的数学模型中不设反馈项且没有直接用于调整相位差的参数, 相位差一般由关节之间的耦合权重控制。在实际应用中, 可以通过有针对性地对原始模型进行相关改进来满足具体的控制需求。

Yu 等<sup>[46]</sup> 建立了 CPG 耦合模型以实现机器海豚三自由度的运动控制。每个 CPG 单元都包含 3 个部分: 基于极限环的神经振荡器、2 个输入饱和函数及输出放大函数。CPG 单元之间采用链式弱耦合的连接关系, 图 8 和图 9 所示分别为 CPG 单元结构和 CPG 拓扑网络。图 8 中:  $d$  为上层输入;  $a$  和  $b$  为状态变量相应的耦合权重;  $f(d)$  和  $g(d)$  分别为第 1、第 2 输入饱和函数;  $h(p)$  为输出放大函数;  $p'$  为放大处理后的 CPG 最终输出。该 CPG 模型具有明确定义的振荡频率和振幅调制, 但未明确指定能确定各单元之间相位关系的参数。

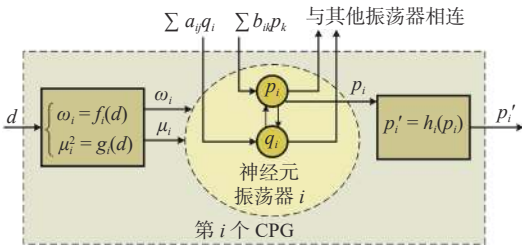


图 8 机器海豚 CPG 单元结构<sup>[47]</sup>

Fig. 8 CPG unit structure of robotic dolphin<sup>[47]</sup>

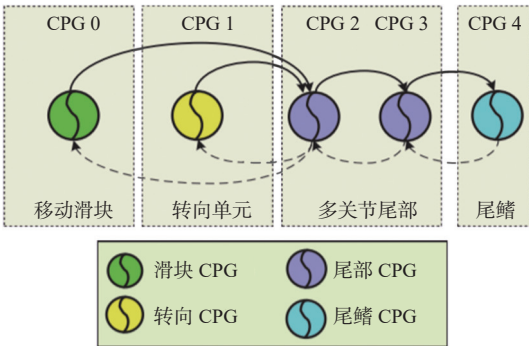


图 9 机器海豚 CPG 网络结构<sup>[47]</sup>

Fig. 9 CPG network structure of robotic dolphin<sup>[47]</sup>

Buchli 等<sup>[47]</sup> 通过引入耦合矩阵和旋转矩阵, 预测了耦合相位振荡器之间的相位关系。根据该思想, Wu 等<sup>[48]</sup> 构建了一个包括一组混合 Hopf 振荡器的改进 CPG 模型, 该振荡器之间的相位差可调, 并且可以采取调整方向偏置因子的方式来产

生非对称的运动以实现转弯机动。CPG 模型如下:

$$\begin{cases} \dot{p}_i = -\omega_i(q_i - l_i) + p_i[\mu_i - p_i^2 - (q_i - l_i)^2] + a[p_{i-1} \cos \varphi_i + (q_{i-1} - l_{i-1}) \sin \varphi_i] \\ \dot{q}_i = \omega_i p_i + (q_i - l_i)[\mu_i - p_i^2 - (q_i - l_i)^2] + b[p_{i+1} \sin \varphi_{i+1} + (q_{i+1} - l_{i+1}) \cos \varphi_{i+1}] \\ \dot{q}_i' = c_i q_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: 下标  $i$  指第  $i$  个振荡器,  $i = 1, \dots, n$ ,  $n$  为 CPG 网络中振荡器的总数;  $q_i'$  为第  $i$  个振荡器的输出信号;  $c_i$  为振荡器输出的放大系数;  $\varphi_i$  为相邻振荡器的相位差;  $l_i$  为引起不对称运动的方向偏置因子。

和岩辉等<sup>[49]</sup> 针对三关节仿鲹科机器鱼的运动控制, 利用 Hopf 振荡器构建基于极限环的 CPG 模型, 引入相位耦合因子用于调控关节之间的耦合权重, 实现了对相位差的自由控制, 并结合模糊控制 (fuzzy controller, FC) 建立了机器鱼定向转弯游动的闭环控制方法, 最后, 通过仿真和试验验证了控制方法的有效性与稳定性。Yan 等<sup>[50]</sup> 设计了一款能在水中游动和水底爬行的双模机器鱼, 在水中游动时使用 3 个 CPG 单元控制 2 个胸鳍和 1 个尾鳍, 在水底爬行时则通过 6 个单元来控制 6 个机械腿的摆动, 通过对耦合权重矩阵进行变换, 实现了 CPG 网络在六边形和三角形这 2 种构型之间的自由重构切换。Nguyen 等<sup>[51]</sup> 通过对长鳍波动机器鱼的运动控制, 采用 16 个耦合的 Hopf 振荡器建立了 CPG 网络, 并引入了改进的粒子群优化方法用于求解 CPG 网络的最优参数, 该 CPG 网络不仅能够提高推力的输出, 还可避免局部最优解的影响, 增强了机器鱼的推进能力。

### 3.2.2 Ijspeert 振荡器

Ijspeert 等<sup>[52]</sup> 基于 Cohen 等<sup>[53]</sup> 对脊椎动物节律性运动的神经控制研究, 分析了蝶螈的运动与视觉引导行为, 在考虑步态转换、身体波动的行波与驻波的切换, 以及身体与肢体之间的协调机制和相关假设的前提下, 构建了一个耦合非线性振荡器系统, 即 Ijspeert 相位振荡模型。该模型结构简单、状态参量较少且意义明确, 可以通过调控模型中的相应参数来调整振荡器之间的相位差, 简化了各个振荡器之间的耦合过程, 具有较高的可操作性。方程如下:

$$\begin{cases} \ddot{r}_i = \xi_i \left[ \frac{\xi_i}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right] \\ \dot{\phi}_i = 2\pi\nu_i + \sum_j w_{ij} \sin(\phi_j - \phi_i - \Delta\varphi_{ij}) \\ \theta_i = r_i [1 + \cos(\phi_i)] \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $r_i, \phi_i$  分别为第  $i$  个振荡器的幅值和相位;  $\theta_i$  为第  $i$  个 Ijspeert 振荡器的输出;  $\xi_i$  为幅值收敛系数, 用于控制幅值的收敛速率;  $R_i$  为期望幅值;  $v_i$  为 Ijspeert 振荡器的固有振动频率;  $w_{ij}$  为振荡器间的耦合权重, 用于控制  $j$  对  $i$  的影响程度;  $\Delta\phi_{ij}$  为控制振荡器之间的相位差。

王彤等<sup>[54]</sup> 为了实现四尾鳍推进的协调运动, 分析了相关尾鳍摆角及攻角之间的耦合关系, 基于 Ijspeert 振荡器建立了 CPG 控制模型(式 7), 提出了巡游、偏航、俯仰等运动的反馈控制策略, 并通过仿真和试验验证了控制方法的快速性与稳定性。郭松子等<sup>[55]</sup> 应用相位振荡器构建了仿鳐鳍机器鱼的 CPG 底层步态控制网络, 并通过 2 个比例-积分-微分 (proportional integral derivative, PID) 控制器实现了对航向和深度的上层控制, 该机器鱼能够实现较为理想的侧 V 型机动、横滚盘旋和翻滚机动运动, 表现出了优秀的机动性能。

$$\begin{cases} \dot{\phi}_i = 2\pi v_i + \sum_j [C_{ij}\mu_j \tanh(\phi_j - \phi_i - \Delta\phi_{ij})] \\ \ddot{\mu}_i = \xi_i \left[ \frac{\xi_i}{4} (R_i + feed_{r,i} - \mu_i) - \dot{\mu}_i \right] \\ \ddot{s}_i = m \left[ \frac{m}{4} (S_i + feed_{s,i} - s_i) - \dot{s}_i \right] \\ \theta_i = s_i + \mu_i \cos(\phi_i) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $m$  为偏移量的收敛系数;  $C_{ij}$  为  $i, j$  自由度运动的耦合强度;  $s_i$  为第  $i$  个振荡器的偏移量;  $S_i$  为期望偏移量;  $feed_{r,i}, feed_{s,i}$  分别为振幅和偏移量的反馈输入, 通过调节各关节振荡器这两项的值来实现俯仰运动和偏航运动, 采用轮换交替的方式实现同时俯仰和偏航的运动要求。

Bal 等<sup>[56]</sup> 为了实现仿鳐鳍机器鱼的自主游动, 构建了基于 Ijspeert 振荡器的 CPG 网络, 网络模型如图 10 所示。每个对称部分分别包括交叉中间神经元 (crossed interneuron, CIN)、外侧中间神经元 (lateral interneuron, LIN)、兴奋性中间神经元 (excitatory interneuron, EIN)、运动神经元 (motor neuron, MN) 和感觉神经元 (sensory neuron, SN) 这 5 种不同的神经元。图 10 中,  $O$  为膜电位,  $\varepsilon_s$  为外部刺激量,  $E$  给出突触后神经元的神经递质电位,  $Y$  为振荡器的输出。构建的 CPG 模型能够产生理想的节律性输出, 可以很方便地调制其幅值、频率、相位差和偏移量。

Cao 等<sup>[57]</sup> 为了使仿蝠鲼机器鱼的运动学姿态更好地贴近真实蝠鲼的运动, 提出了式(8)所示的基于 Ijspeert 振荡器的 CPG 模型, 并提出了一种基于遗传算法和粒子群优化算法的参数优化方法 用于调整 CPG 参数, 最终, 蝠鲼机器鱼达到了

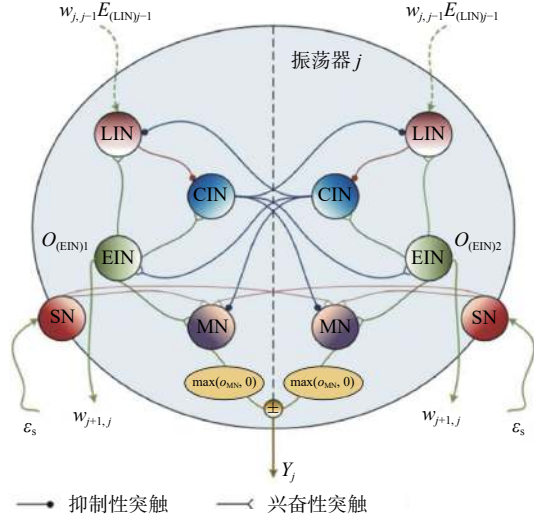


图 10 鲹科模式机器鱼 CPG 网络结构<sup>[57]</sup>  
Fig. 10 CPG network structure of Carangiform robotic fish<sup>[57]</sup>

88.53% 的运动相似度。

$$\begin{cases} v_i = v_{i\_up} = \frac{1}{2\eta_i T_i}, & \dot{\theta}_i > 0 \\ v_i = v_{i\_down} = \frac{1}{2(1-\eta_i)T_i}, & \dot{\theta}_i \leq 0 \\ \dot{r}_i = \xi_i \left[ \frac{\xi_i}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right] \\ \dot{r}_{xi} = m_i \left[ \frac{m_i}{4} ((2\delta_i - 1)R_i - r_{xi}) - \dot{r}_{xi} \right], & R_i \neq 0 \\ \dot{\phi}_i = 2\pi v_i + \sum_j w_{ij} \sin(\phi_j - \phi_i - \Delta\phi_{ij}) \\ \theta_i = r_{xi} + r_i \sin(\phi_i) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T_i$  为振动周期;  $v_{i\_up}, v_{i\_down}$  分别指胸鳍处于向上的振动行程和向下的振动行程, 可根据角速度  $\dot{\theta}_i$  的正负来判断;  $\eta_i$  为时间不对称系数;  $r_{xi}$  为偏差;  $\delta_i$  为步调不对称系数。

### 3.2.3 Kimura 振荡器

Matsuoka<sup>[58-59]</sup> 通过研究生物在自发运动过程中神经细胞的活动情况, 强调了神经元的适应性对振荡的出现所起的重要作用, 并尝试将模拟神经元疲劳特性的适应项加入漏极积分器微分方程, 提出了 Matsuoka 振荡器。该振荡器是机器人领域中早期应用最多的振荡器模型, 但因只能产生对称输出的性质, 故限制了其在许多机器鱼控制方面的应用。Kimura 等<sup>[60]</sup> 针对 Matsuoka 振荡器的不足进行改进, 提出了 Kimura 振荡器模型。该模型通过屈肌和伸肌这 2 个相互耦合抑制的神经元的输出差值来产生非对称正负值输出, 弥补了 Matsuoka 振荡器的最大缺陷, 具有明确的生物学意义和良好的生物学特性, 为实现机器鱼的偏航、俯仰等运动要求提供了解决方法, 但参数间的独立性较弱, 难以明确其间的耦合关系, 调整



起来较为困难,在机器鱼控制方面应用较为有限。Kimura 振荡器模型如下:

$$\begin{cases} T_r \dot{u}_i^{[e,f]} + u_i^{[e,f]} = \sum_{j=1}^n w_{ij} Y_j^{[e,f]} + w_{ie} Y_i^{[e,f]} - \beta_k v_i^{[e,f]} + feed_i^{[e,f]} + u_0 \\ T_a v_i^{[e,f]} + v_i^{[e,f]} = Y_i^{[e,f]} \\ Y_i^{[e,f]} = \max(u_i^{[e,f]}, 0) \\ Y_i = -Y_i^{[e]} + Y_i^{[f]} \end{cases} \quad (9)$$

式中:下标  $i$  为振荡器序号;上标  $f, e$  分别指屈肌神经元和伸肌神经元;  $T_r$  和  $T_a$  为时间常数;  $u_i^{[e,f]}$  为两神经元的内部状态变量;  $v_i^{[e,f]}$  为两神经元的自抑制状态;  $Y_i^{[e]}$ ,  $Y_i^{[f]}$  为两神经元的输出;  $w_{ie}$  为神经元间的耦合权重;  $\beta_k$  为自抑制对内部状态的影响

程度;  $u_0$  和  $feed_i^{[e,f]}$  分别为外界激励输入和外界反馈输入。

Chowdhury 等<sup>[61]</sup> 在细长体理论框架下开发了基于 Matsuoka 振荡器的鲹科模式机器鱼的生物协调 CPG 模型,讨论了使用 CPG 信号对鱼体波进行外部调制的新型轨迹生成。Wang 等<sup>[62]</sup> 通过 4 个基于 Kimura 振荡器的耦合 CPG 单元,实现了对机器鱼左、右胸鳍及尾鳍的控制,并对所制定的俯仰和转向控制策略进行了仿真模拟,结果表明了 CPG 模型和反馈策略的适用性。

### 3.3 底层步态控制方法对比分析

3 种典型机器鱼步态控制方法的模型、结构、受控参数以及优劣势的对比分析如表 1 所示。

表 1 仿生机器鱼步态控制方法对比

| Table 1 Comparison of gait control methods for bionic robotic fish |          |              |                       |   |   |
|--|----------|--------------|-----------------------|---|---|
| 步态控制方法   | 数学模型     | 系统结构         | 受控参数                  | 优势  | 劣势  |
| 轨迹逼近方法   | 鱼类理想运动方程 |              | 波长、频率等运动参数            | 1. 原理简单,易于实现<br>2. 基于准确的运动学方程,能在宏观上实现与真实鱼类相同的运动方式   | 1. 离散点间的过渡不平稳,导致关节间产生了较大的瞬时加速度,限制了推进性能<br>2. 游动步态的形式种类有限,灵活性差<br>3. 参数集维度、关节结构等因素限制了连杆的数目,难以很好地拟合理想运动方程 |
| 周期信号生成器  | 谐波波动方程   | 多信号发生器的串联结构  | 频率、相位等谐波参数            | 1. 模型结构简单,受控参数与运动状态的关系明确,便于编程实现<br>2. 受控参数调整方便,步态灵活可控   | 1. 谐波参数的频繁大范围变化会导致运动不够平滑<br>2. 难以引入反馈项来实现闭环控制   |
| 中枢模式发生器  | 振荡器模型    | 多振荡器的串并联耦合结构 | 耦合权重、相位差、偏置因子等振荡器模型参数 | 1. 可根据运动控制要求灵活调整串并联耦合关系<br>2. 模型输入信号维度低<br>3. 受控参数与输出特性之间关系明确,运动方式灵活可控<br>4. 便于引入外部反馈,实现闭环控制<br>5. 参数突变不会影响运动的平滑性 | 1. 数学模型不具通用性,建立的过程繁琐、困难<br>2. 基础理论研究不够完善,缺乏成体系理论系统的支撑   |

## 4 仿生机器鱼闭环运动控制方法

仿生机器鱼的运动控制系统可以分为开环控制系统和闭环控制系统 2 大类。开环控制系统结构简单、构建方便,通过上节所述的底层步态控制方法即可实现机器鱼运动部位节律性、周期性的运动,在机器鱼的推进性能及推进机理实验研究中得到了广泛应用。在实际的自主运动控制中,与传统的水下机器人类似<sup>[63-64]</sup>,机器鱼在运动中会频繁受到自身或者外界扰动的影响,具有许多强耦合、不稳定、非线性因素,因此需要更高层的神经中枢结合实时控制需求来对机器鱼底层步态控制系统中的参数进行实时调整,从而实现闭环控制。

与传统的水下机器人相比,仿生机器鱼在推进模式、驱动结构、模型精度、被控对象(参数)、传感方式等方面显著不同,这些方面均对闭环控制系统的设计、性能以及闭环算法的选择造成了一定的影响,具体表现为:

- 1) 机器鱼特有的摆动或者波动的推进模式导致流体与鱼体的相互耦合作用更加复杂,驱动部位的主动运动会对整体稳定性造成很大影响并且这种影响难以通过模型算法进行精确量化,因而对闭环控制系统的响应速度和控制精度提出了更高的要求。
- 2) 许多机器鱼采用了 SMA, IPMC 等新型驱动材料来驱动,这使得系统的输出信号需要根据材料的驱动参数、驱动模型进行相应的特殊处理

才能实现控制作用; 另一方面, 柔性驱动结构增加了控制系统在输出信号维度方面的复杂程度。

3) 机器鱼的推进机理尚不明确, 水动力模型的精度通常比较低, 从而导致对闭环控制系统的控制精度以及优化方向的确定等造成影响, 尤其对基于动力学模型的控制方法的应用造成了很大的限制。

4) 基于 CPG 的底层步态控制方法被广泛使用, 许多研究需要根据 CPG 模型和网络结构制定合理的控制策略, 从而明确 CPG 模型中相位差、偏置因子等被控参数的调控思路。

5) 基于仿生学原理, 许多机器鱼采用了人工侧线等仿生传感方式, 这使得控制系统的输入信号形式存在显著差异。

因此, 在应用闭环算法构建机器鱼的闭环运动控制系统时, 需要额外考虑以上因素造成的影响。仿生机器鱼领域应用较为广泛的闭环运动控制方法主要有 PID 控制、模型预测控制(model predictive control, MPC)和滑模控制(sliding mode control, SMC)等经典控制方法, 以及 FC、基于学习的控制(learning-based control, LBC)方法等智能控制方法。本节将对这些方法及其在机器鱼运动控制中的应用展开介绍, 并予以对比分析。

## 4.1 经典运动控制方法

### 4.1.1 PID 控制方法

该方法是根据期望与实际输出的偏差, 通过比例、积分、微分这 3 个环节的线性组合而得出控制量, 因其原理简单、设计方便、可靠性高, 成为工业应用最广泛的控制算法之一, 并且在仿生机器鱼领域也有着较多的应用。但因仿生机器鱼的模型不精确, 外界工况变化明显且频繁, 多个控制回路之间存在耦合关系, 因而导致出现了参数整定困难等问题, 单纯的 PID 控制通常并不能完全满足控制要求, 只能作为一种可简单实现闭环控制的简便算法来加以应用。

Wang 等<sup>[65]</sup> 在一个胸鳍尾鳍协同运动的机器鱼上实现了对游速、偏航角和俯仰角的实时控制, 重点设计了基于 Ijspeert 振荡器的 CPG 网络, 并通过 PID 算法实现了闭环控制。Phamduy 等<sup>[66]</sup> 提出了一种用于机器鱼的新型自主水下充电系统, 在机器鱼与充电站的对接阶段, 采用基于摄像机视觉反馈的 PID 控制器调节了机器鱼朝向与所需航向间的误差, 对接试验结果显示对接成功率达到了 81%, 并且在 40°以上接近角的困难情况下, 机器鱼最多可以在 3 次尝试内完成对接, 但所采用的 PID 控制器鲁棒性有限, 可能并不是该问

题的最优解。

### 4.1.2 MPC 控制方法

该方法是以优化的思想方法来处理控制问题, 然后根据适当的预测模型, 考虑在未来有限时间域的反复滚动优化, 及时求解最优解作为控制量, 即可弥补因模型不精确及外界扰动等不确定因素引发的问题, 从而为处理不确定性、非线性以及状态约束问题提供有效框架, 被广泛应用于机器鱼的运动控制。Zhang 等<sup>[67]</sup> 在 Wang 等<sup>[41]</sup> 提出的比例平均法的基础上, 推导了一个尾鳍驱动机器鱼动力学模型, 其针对机器鱼不能产生负推力而只能通过黏性力减速的情况, 推导了最大速度约束, 随后考虑到不同的方向定义方式, 对航向-方位-速度(heading-orientation-velocity, HOV)控制策略(即按照先保证航向满足运动要求, 再确保方位要求, 最后确保速度要求的控制顺序)和速度-方位-速度(velocity-orientation-velocity, VOV)控制策略展开研究, 提出了结合两者优点的二阶方位-速度非线性模型预测控制器(two-stage orientation-velocity nonlinear model predictive controller, TSOV-NMPC), 最后通过仿真实验验证了该控制算法相比 HOV 控制方法和 VOV 控制方法等其他控制方法在准确度、适应性方面的优越性。Castaño 等<sup>[68]</sup> 应用非线性 MPC 控制方法实现了机器鱼的路径跟踪, 为了最大限度地利用可容许控制并以计算效率高的方式处理非线性控制约束, 对控制输入采用了分析投影方案, 仿真和实验结果均体现了控制投影方法和非线性 MPC 控制方法的有效性。Wang 等<sup>[69]</sup> 针对机器海豚滑翔运动的深度控制, 提出了一种基于 MPC 的控制系统新型深度控制策略, 其中包括模型预测深度控制器、基于速度的 PID 航向控制器和滑模观测器(sliding mode observer, SMO), 并进行了仿真和实验, 结果显示该控制方法能够满足机器海豚深度控制的要求。

### 4.1.3 SMC 控制方法

该方法采用控制切换法则, 可以根据系统的实时状态来按照预定的动态轨迹及时调整系统结构, 其预定轨迹与对象模型参数变动及外界扰动无关, 能够很好地解决机器鱼建模上的非精确性和系统非线性问题, 在外界扰动的情况下表现出了强鲁棒性。Verma 等<sup>[40]</sup> 应用数据辅助建模方法建立了一个鳗科模式的机器鱼动力学模型, 其针对机器鱼的速度控制设计了离散时间滑模控制器, 并通过试验验证了基于推力延迟和非线性模型的 SMC 控制的优越控制性能。Ye 等<sup>[70]</sup> 提出了基于数据驱动动力学模型的机器鱼的离散时间积

分终端滑模 (discrete-time integral terminal sliding mode, DITSM) 控制器, 在该控制器下, 机器鱼能够实现高精度的速度跟踪性能。

4.2 智能运动控制方法

4.2.1 FC 控制方法

FC 是仿照人类模糊性的控制思维, 基于模糊逻辑推理、模糊语言变量和模糊集合理论, 构建相应的模糊知识库、模糊推理逻辑以及模糊机和解模糊机, 从而实现不依赖精确模型和系统对象信息的有效控制。FC 属于智能控制方法, 是处理非线性动力学的有力工具, 能够有效应对机器鱼运动过程中的复杂性因素, 对于解决机器鱼因自身运动所造成的系统不稳定情况尤为有效, 这就使得它成为机器鱼闭环运动控制的理想选择。Bal 等<sup>[56]</sup> 针对一个具有双连杆尾部推进机构的鳐科模式机器鱼开发了基于 CPG 网络的模糊闭环控制系统, 以实现机器鱼的自主游动和避障。该方法利用由惯性测量单元 (inertial measurement unit, IMU) 测得的偏航角和由红外传感器测得的障碍物数据作为 FC 的输入, 以 CPG 模型中感觉

神经元的外部刺激量作为输出, 并采用 Mamdani 法的模糊推理方式, 选用重心法实现了对控制量的解模糊。模糊规则库如图 11 所示, 机器鱼闭环控制系统的结构如图 12 所示。图中,  $S_f$ ,  $S_l$  和  $S_r$  分别代表前、左、右处的红外传感器,  $\alpha_m$  和  $\gamma_m$  为机器鱼电机控制单元的相位系数。系统中还引入了有限状态机 (finite state machine, FSM) 算法, 以便于任务的自主执行, 而且通过脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 发生器将 CPG 网络产生的输出信号转变为 PWM 信号。针对机器鱼的泳池试验结果表明, 该机器鱼具有良好的自主游动性能, 所提出的闭环控制系统在有随机障碍物的情况下也能很好地控制偏航运动, 具有良好的鲁棒性和适应性。李宗刚等<sup>[71]</sup> 根据机器鱼由起始深度进入期望深度巡游边界, 和在期望深度定深巡游的运动过程以及深度误差变化, 将运动阶段分为趋近阶段和巡游阶段, 构建了趋近 FC 和巡游 FC 以适应在这 2 个阶段的运动控制要求, 仿真和试验结果表明, 机器鱼的趋近速度较快, 定深巡游的深度误差小, 所提 FC 控制方法具有良好的控制性能。

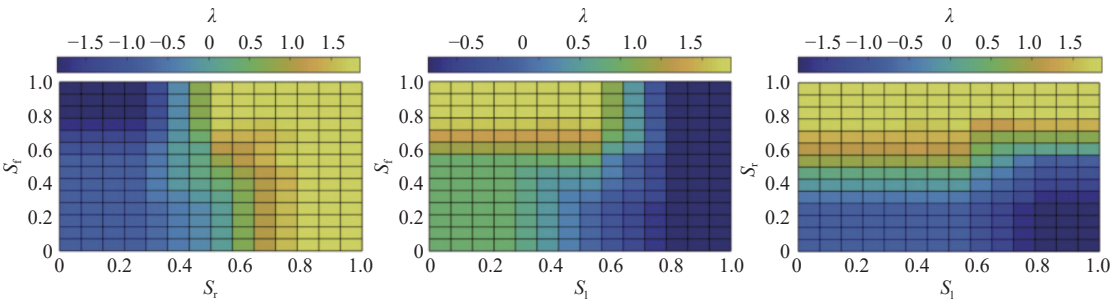


图 11 模糊规则库<sup>[57]</sup>  
Fig. 11 Fuzzy rule base<sup>[57]</sup>

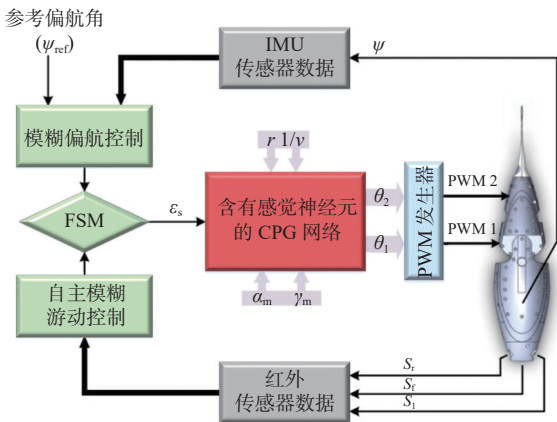


图 12 模糊闭环控制系统<sup>[57]</sup>  
Fig. 12 Fuzzy closed-loop control system<sup>[57]</sup>

4.2.2 LBC 控制方法

基于学习和优化的智能控制方法在处理复

杂、高级、重复性的问题上表现出了优异的能力, 得到越来越多的关注和应用。其中, 迭代学习控制不要求系统有精确的模型, 算法简便, 其根据之前多次操作中的误差信息, 通过学习算法来调控输入, 便可改善下一次的输出情况, 通过采用如此反复迭代修正的方式优化输入信号, 最终可实现对期望值的瞬态高精度跟踪, 这在很大程度上避免了跟踪滞后的情况。Li 等<sup>[72]</sup> 将迭代学习控制方法应用到了一个双连杆鳐科模式机器鱼上, 用于提高其速度跟踪性能。Wang 等<sup>[73]</sup> 设计了三关节仿生机器鱼的迭代学习控制器, 并进行了鱼体波轨迹跟踪控制仿真实验, 结果证明了控制方法的可行性。在目前对仿生机器鱼的精确建模还有着很大实现难度的情况下, 基于学习的控制方法另辟蹊径、表现优异, 占据着重要地位。此外, 其他一些学习算法和模型参数调整算法也



实现了良好的控制结果。Ren 等<sup>[74]</sup>提出了一种基于通用内部模型(general internal model, GIM)的学习方法,其中模型包括内部 Hopf 振荡器、人工神经网络和外部信号调制器,神经网络提供有优异的函数逼近能力,外部信号调制器又可以实现对输出幅度的调整,在许多情况下能减小训练量和运算量。Li 等<sup>[75]</sup>提出了一种深度强化学习框架,其中包括收集用于神经网络训练数据的机器人仿真方法、神经网络控制器和现实中收集空间信息的视觉方法,并在实验中实现了软体机器人在湍流中的直线游动。

粒子群优化算法是一种基于迭代的优化算法,其各个粒子根据个体极值(个体最优解)和全局极值(种群最优解)来迭代更新自己的位置与速度,在迭代完成后达到全局最佳位置。Yu 等<sup>[76]</sup>通过粒子群优化算法与动态模型的组合对 CPG 特征参数进行了优化,通过对机器鱼进行前游、后游实验,验证了该优化方案对游泳性能的提高作用。

遗传算法是通过反复选择、交叉、变异、重组来优化候选解集合,同时针对一组候选解决方案,使种群中的个体要素组合不断趋近最优,相比传统优化算法,采用该方法更容易得到全局最

优解。Zhou 等<sup>[77]</sup>应用遗传算法很好地实现了 CPG 模型最优参数集,亦即最佳游动步态的在线搜索。

4.2.3 混合控制方法

采用多种控制方法结合的混合控制方法可以弥补单种控制方法的短板,实现更广的应用场景和更好的控制效果。宋英杰等<sup>[78]</sup>在串联 PID 的基础上结合 FC 控制方法,实时整定了速度环(线速度环和角速度环)的 PID 参数,仿真实验结果表明,所提模糊自适应 PID 控制方法减少了位姿调整时间,降低了稳态误差。Yu 等<sup>[79]</sup>将 SMC 控制与 FC 策略相结合,提出了一种混合控制方法,用于调节仿生机器海豚在竖直方向上的位移状况。Wang 等<sup>[80]</sup>研制了一款波动鳍推进的新型仿生机器鱼,开发了一种主动抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)与 FC 相结合的混合控制策略,以实现机器鱼的闭环深度控制,并通过游泳试验验证了该控制方法的优越性。

4.3 闭环运动控制方法对比分析

机器鱼典型的闭环运动控制方法优劣对比如表 2 所示。表中指出了各控制方法对于模型的依赖程度和建议的优化方向。

表 2 仿生机器鱼闭环运动控制方法对比

Table 2 Comparison of closed-loop motion control methods for bionic robotic fish

| 闭环控制方法 | 模型依赖程度 | 优势                                 | 劣势  | 优化方向                                |
|--------|--------|------------------------------------|---|-------------------------------------|
| PID    | 高      | 结构简单,应用灵活,可靠性高                     | 抗扰动能力差,控制精度不高                               | 与其他算法相结合以实现更好的控制性能                  |
| MPC    | 高      | 能够有效解决被控对象非线性、时变性、不确定性、动态滞后的问题     | 运算量大,受硬件算力的限制可能导致实时控制精度达不到理想情况              | 应用模型降阶、离线预计算等方法降低计算的复杂度,减少运算时间      |
| SMC    | 低      | 对于系统参数变化和干扰具有很强的鲁棒性                | 存在抖振问题,影响系统的控制精度                            | 应用动态滑模、渐进滑模等方法优化抖振问题                |
| FC     | 低      | 受被控对象模型扰动的影晌小,强扰动下也能保持较高的控制性能      | 设计方法、设计流程不够系统,不恰当的模糊与解模糊处理会导致系统的动态性能及控制精度降低 | 与粒子群优化算法、遗传算法等智能优化算法结合,实现对 FC 规则的优化 |
| LBC    | 低      | 具有很强的数据处理能力,对于解决复杂、高级的控制问题表现出显著的优势 | 不擅长应对未知的新型扰动,对于高精度的控制任务可能难以胜任               | 与有模型的控制方法结合,兼顾两者优点                  |

5 总结与展望

仿生机器鱼在近 30 年的时间取得了快速发展,针对机器鱼的控制方法持续更新优化,性能稳步提高,基于不同模式和设计理念的仿生机器鱼在各自擅长的方面达到了越来越理想的效果。然而,尽管许多研究都表明仿生机器鱼在理想情况下相对于传统水下机器人在推进效率、环境扰动、游动速度等方面具有较大的优势,但在水下

矿产探测、水质检测等实际应用中仍然呈现以技术更为成熟的传统水下机器人为主导的局面。目前,大多数仿生机器鱼还处于仿真模拟和样机研制阶段,在机动性、稳定性和推进速度等方面与真实的鱼类存在很大差距,难以达到理想的情况。究其原因,仿生机器鱼的推进机理还不够明确,数学模型还不够准确,许多研究所采用的控制方法不够高效,并不能很好地适应机器鱼的运动模式和运动要求,这些方面都限制了机器鱼各

项性能的提升。

对于机器鱼的底层步态控制, 轨迹逼近和正弦控制器这类基于运动学的方法直观、简便, 不需要复杂困难的建模过程即可实现形似鱼类的运动形式, 但在运动平稳性、灵活性以及与真实鱼类运动的趋近程度方面还难以取得满意的结果。而 CPG 具有灵活的数学模型和网络结构, 不仅可自发地产生节律运动控制信号, 还可接收高层控制中枢的指令来调控内部参数以实现不同的运动行为, 从而满足大多数仿生鱼对周期节律性运动的要求, 具有明显的优势。随着对 CPG 理论和模型的研究, 所建立的 CPG 模型将具有更加清晰、明确的方程结构, 建模流程也将更加简便, 参数调整更为方便易行; 基于 CPG 的控制方法将有着更强的稳定性和灵活性, 能适用于更多的运动形式, 在仿生机器鱼底层步态控制中占据主导地位。

被广泛应用于水下机器人领域的闭环运动控制方法, 例如 FC, SMC, MPC 等同样适用于机器鱼的闭环控制, 但需针对机器鱼的特殊推进方式进行适当的调整, 许多学者基于这些控制方法及相应的混合控制方法实现了高效的仿生机器鱼闭环控制。随着机器学习的飞速发展, 基于学习的智能控制和优化算法凭借其强自主性、低模型依赖性和对复杂环境的高适应性引起了广泛关注, 有着更为广阔的发展前景, 在机器鱼精确建模困难的现状下尤其具有研究意义。在各项控制理论、框架和控制实例的不断积累情况下, 针对仿生机器鱼的控制将结合不同算法之间的优势, 使之具有更广泛的环境适应性和更强的抗扰动性能, 从而向着智能化、高效率和高精度的方向发展。

除本文重点讨论的方面以外, 水下减阻、水下感知、特种驱动材料等也会对机器鱼的整体性能产生巨大影响。随着以上这些领域的进步, 仿生机器鱼将具有更为优越的推进性能和更为智能化的自主性, 能适应更为复杂多变的外界环境, 并且凭借其相比传统水下机器人的独特优势, 还可去往深海远海, 实现在各行各业的具体应用, 成为水下机器人领域中更加重要的组成部分。

## 参考文献:

- [1] 喻俊志, 陈尔奎, 王硕, 等. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(4): 485–491.  
YU J Z, CHEN E K, WANG S, et al. Research evolution and analysis of biomimetic robot fish[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(4): 485–491 (in Chinese).
- [2] 王安忆, 刘贵杰, 王新宝, 等. 身体/尾鳍推进模式仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(17): 137–146.
- WANG A Y, LIU G J, WANG X B, et al. Development and analysis of body and/or caudal fin biomimetic robot fish[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(17): 137–146 (in Chinese).
- [3] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G S. An efficient swimming machine[J]. *Scientific American*, 1995, 272(3): 64–70.
- [4] BREDER C M, Jr. The locomotion of fishes[J]. *Zoologica*, 1926, 4: 159–297.
- [5] WEBB P W. Form and function in fish swimming[J]. *Scientific American*, 1984, 251(1): 72–83.
- [6] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1999, 24(2): 237–252.
- [7] NGUYEN D Q, HO V A. Anguilliform swimming performance of an eel-inspired soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2022, 9(3): 425–439.
- [8] MURALIDHARAN M, PALANI I A. Development of Subcarangiform bionic robotic fish propelled by shape memory alloy actuators[J]. *Defence Science Journal*, 2021, 71(1): 94–101.
- [9] DU S, WU Z X, WANG J, et al. Design and control of a two-motor-actuated tuna-inspired robot system[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(8): 4670–4680.
- [10] MATTA A, PENDAR H, BATTAGLIA F, et al. Impact of caudal fin shape on thrust production of a Thunniform swimmer[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2020, 17(2): 254–269.
- [11] JI D X, REHMAN F U, AJWAD S A, et al. Design and development of autonomous robotic fish for object detection and tracking[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17(3): 1–11.
- [12] LIU Q M, CHEN H, WANG Z H, et al. A manta ray robot with soft material based flapping wing[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(7): 962.
- [13] ZHOU C L, LOW K H. Better endurance and load capacity: an improved design of manta ray robot (RoMan-II)[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2010, 7(4): S137–S144.
- [14] LIU H L, CURET O. Swimming performance of a bio-inspired robotic vessel with undulating fin propulsion[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, 13(5): 056006.
- [15] ZHONG Y, LI Z, DU R X. Robot fish with two-DOF pectoral fins and a wire-driven caudal fin[J]. *Advanced Robotics*, 2018, 32(1): 25–36.
- [16] SHADWICK R E, GEMBALLA S. Structure, kinematics, and muscle dynamics in undulatory swimming[J]. *Fish Physiology*, 2005, 23: 241–280.
- [17] FLAMMANG B E, LAUDER G V. Functional morpho-

- logy and hydrodynamics of backward swimming in bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*[J]. *Zoology*, 2016, 119(5): 414–420.
- [18] CHEN Z, SHATARA S, TAN X B. Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer–metal composite caudal fin[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(3): 448–459.
- [19] WANG Z L, HANG G R, LI J, et al. A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 144(2): 354–360.
- [20] LI Y, XU Y T, WU Z G, et al. A comprehensive review on fish-inspired robots[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2022, 19(3): 1–20.
- [21] DRUCKER E G, LAUDER G V. Locomotor function of the dorsal fin in teleost fishes: experimental analysis of wake forces in sunfish[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(17): 2943–2958.
- [22] MENG H F, LOU J Q, CHEN T H, et al. Cantilever-based micro thrust measurement and pressure field distribution of biomimetic robot fish actuated by macro fiber composites (MFCs) actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(3): 035001.
- [23] HAWKINS O H, ORTEGA-JIMÉNEZ V M, SANFORD C P. Knife-fish turning control and hydrodynamics during forward swimming[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2022, 225(7): jeb243498.
- [24] SUN W G, LIU Z M, REN Z Y, et al. Linear acceleration of an undulatory robotic fish with dynamic morphing median fin under the instantaneous self-propelled condition[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2020, 17(2): 241–253.
- [25] REN Z Y, YANG X B, WANG T M, et al. Hydrodynamics of a robotic fish tail: effects of the caudal peduncle, fin ray motions and the flow speed[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(1): 016008.
- [26] ZHAO Z J, DOU L. Computational research on a combined undulating-motion pattern considering undulations of both the ribbon fin and fish body[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 183: 1–10.
- [27] SHIRGAONKAR A A, CURET O M, PATANKAR N A, et al. The hydrodynamics of ribbon-fin propulsion during impulsive motion[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2008, 211(21): 3490–3503.
- [28] TIAN R Y, LI L, WANG W, et al. CFD based parameter tuning for motion control of robotic fish[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2020, 15(2): 026008.
- [29] TAYLOR G I. Analysis of the swimming of long and narrow animals[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1952, 214(1117): 158–183.
- [30] LIGHTHILL M J. Aquatic animal propulsion of high hydromechanical efficiency[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1970, 44(2): 265–301.
- [31] LIGHTHILL M J. Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1971, 179(1055): 125–138.
- [32] WU T Y T. Swimming of a waving plate[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 10(3): 321–344.
- [33] CHENG J Y, ZHUANG L X, TONG B G. Analysis of swimming three-dimensional waving plates[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 232: 341–355.
- [34] HORLOCK J H. Actuator disk theory: discontinuities in thermo-fluid dynamics[M]. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1978.
- [35] AURELI M, KOPMAN V, PORFIRI M. Free-locomotion of underwater vehicles actuated by ionic polymer metal composites[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(4): 603–614.
- [36] HU D Y, LOU J Q, CHEN T H, et al. Micro thrust measurement experiment and pressure field evolution of bionic robotic fish with harmonic actuation of macro fiber composites[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 153: 107538.
- [37] BLAKE R W. Undulatory median fin propulsion of two teleosts with different modes of life[J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1980, 58(11): 2116–2119.
- [38] JIANG H Z, LIU Y W. Nonlinear analysis of compliant robotic fish locomotion[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2022, 28(13/14): 1673–1685.
- [39] YU J Z, YUAN J, WU Z X, et al. Data-driven dynamic modeling for a swimming robotic fish[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(9): 5632–5640.
- [40] VERMA S, XU J X. Data-assisted modeling and speed control of a robotic fish[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(5): 4150–4157.
- [41] WANG J X, TAN X B. Averaging tail-actuated robotic fish dynamics through force and moment scaling[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(4): 906–917.
- [42] LIGHTHILL M J. Note on the swimming of slender fish[J]. *Journal of fluid Mechanics*, 1960, 9(2): 305–317.
- [43] YU J Z, SUN F H, XU D, et al. Embedded vision-guided 3-D tracking control for robotic fish[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(1): 355–363.
- [44] JAN IJSPEERT A. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review[J]. *Neural Networks*, 2008, 21(4): 642–653.
- [45] AMARI S I. Characteristics of random nets of analog neuron-like elements[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1972, SMC-2(5): 643–657.
- [46] YU J Z, WANG M, TAN M, et al. Three-dimensional swimming[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2011, 18(4): 47–58.



- [47] BUCHLI J, JAN IJSPEERT A. Distributed central pattern generator model for robotics application based on phase sensitivity analysis[C]//Proceedings of the First International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology. Lausanne, Switzerland: Springer, 2004, 3141: 333–349.
- [48] WU Z X, YU J Z, TAN M, et al. Kinematic comparison of forward and backward swimming and maneuvering in a self-propelled sub-carangiform robotic fish[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2014, 11(2): 199–212.
- [49] 和岩辉, 胡桥, 王朝晖, 等. 基于 CPG 和模糊控制的机器鱼定向游动精确控制方法 [J]. *水下无人系统学报*, 2021, 29(1): 39–47.  
HE Y H, HU Q, WANG Z H, et al. Precise control method for directional swimming of a robotic fish based on CPG and fuzzy control[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2021, 29(1): 39–47 (in Chinese).
- [50] YAN Z P, YANG H Y, ZHANG W, et al. Research on motion mode switching method based on CPG network reconstruction[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 224871–224883.
- [51] NGUYEN V D, TRAN Q D, VU Q T, et al. Force optimization of elongated undulating fin robot using improved PSO-based CPG[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022: 2763865.
- [52] JAN IJSPEERT A, ARBIB M A. Locomotion and visually guided behavior in salamander: a neuromechanical study[C]//Proceedings of SPIE 4196, Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III. Boston, MA, USA: SPIE, 2000, 4196: 62–71.
- [53] COHEN A H, ROSSIGNOL S, GRILLNER S. Neural control of rhythmic movements in vertebrates[M]. New York: Wiley, 1988.
- [54] 王彤, 高东奇, 张世武, 等. 多自由度仿生推进系统的 CPG 控制 [J]. *实验力学*, 2016, 31(4): 440–450.  
WANG T, GAO D Q, ZHANG S W, et al. On the CPG control strategy for biomimetic propeller system with multi motion freedom degrees[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(4): 440–450 (in Chinese).
- [55] 郭松子, 马俊, 李志印, 等. 拍动式仿鳐鱼水下机器人设计及其游动性能试验 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(4): 139–144.  
GUO S Z, MA J, LI Z Y, et al. Design and swimming test of myliobatid-inspired robot[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(4): 139–144 (in both Chinese and English).
- [56] BAL C, KOCA G O, KORKMAZ D, et al. CPG-based autonomous swimming control for multi-tasks of a bio-mimetic robotic fish[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106334.
- [57] CAO Y H, MA S M, CAO Y Z, et al. Similarity evaluation rule and motion posture optimization for a manta ray robot[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(7): 908.
- [58] MATSUOKA K. Sustained oscillations generated by mutually inhibiting neurons with adaptation[J]. *Biological Cybernetics*, 1985, 52(6): 367–376.
- [59] MATSUOKA K. Mechanisms of frequency and pattern control in the neural rhythm generators[J]. *Biological Cybernetics*, 1987, 56(5/6): 345–353.
- [60] KIMURA H, FUKUOKA Y, NAKAMURA H. Biologically inspired adaptive dynamic walking of the quadruped on irregular terrain[M]//HOLLERBACH J M, KODITSCHKE D E. The Ninth International Symposium on Robotics Research. London: Springer, 2000: 329–336.
- [61] CHOWDHURY A R, PANDA S K. Finding answers to biological control methods using modulated patterns: an application to bio-inspired robotic fish[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE, 2015: 3146–3153.
- [62] WANG L, WANG S, CAO Z Q, et al. Motion control of a robot fish based on CPG[C]//2005 IEEE International Conference on Industrial Technology. Hong Kong, China: IEEE, 2005: 1263–1268.
- [63] 陈浩华, 赵红, 王宁, 等. 复杂扰动下水下机器人的轨迹精确跟踪控制 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(2): 98–108.  
CHEN H H, ZHAO H, WANG N, et al. Accurate track control of unmanned underwater vehicle under complex disturbances[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(2): 98–108 (in both Chinese and English).
- [64] 王永鼎, 王鹏, 孙鹏飞. 自主式水下机器人控制技术研究综述 [J]. *世界科技研究与发展*, 2021, 43(6): 636–648.  
WANG Y D, WANG P, SUN P F. Review on research of control technology of autonomous underwater vehicle[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2021, 43(6): 636–648 (in Chinese).
- [65] WANG W, XIE G M. CPG-based locomotion controller design for a boxfish-like robot[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, 11(6): 87.
- [66] PHAMDUY P, CHEONG J, PORFIRI M. An autonomous charging system for a robotic fish[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2953–2963.
- [67] ZHANG P F, WU Z X, MENG Y, et al. Nonlinear model predictive position control for a tail-actuated robotic fish[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 101(4): 2235–2247.
- [68] CASTAÑO M L, TAN X B. Model predictive control-based path-following for tail-actuated robotic fish[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2019, 141(7): 071012.
- [69] WANG J, WU Z X, TAN M, et al. Model predictive control-based depth control in gliding motion of a gliding robotic dolphin[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(9): 5466–5477.
- [70] YE M, WANG H, YAZDANI A, et al. Discrete-time integral terminal sliding mode-based speed tracking control for a robotic fish[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2021,

105(1): 359–370.

[71] 李宗刚, 夏文卿, 葛立明, 等. 仿生机器鱼胸/尾鳍协同推进闭环深度控制 [J]. 机器人, 2020, 42(1): 110–119. LI Z G, XIA W Q, GE L M, et al. Closed loop depth control of biomimetic robotic fish cooperatively driven by pectoral fin and caudal fin[J]. Robot, 2020, 42(1): 110–119 (in Chinese).

[72] LI X F, REN Q Y, XU J X. Precise speed tracking control of a robotic fish via iterative learning control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2221–2228.

[73] WANG M, ZHANG Y L, DONG H F, et al. Trajectory tracking control of a bionic robotic fish based on iterative learning[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(7): 170202.

[74] REN Q Y, XU J X, FAN L P, et al. A GIM-based biomimetic learning approach for motion generation of a multi-joint robotic fish[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4): 423–433.

[75] LI G D, SHINTAKE J, HAYASHIBE M. Deep reinforcement learning framework for underwater locomotion of soft robot[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an, China: IEEE, 2021: 12033-12039.

[76] YU J Z, WU Z X, WANG M, et al. CPG network optimization for a biomimetic robotic fish via PSO[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(9): 1962–1968.

[77] ZHOU C L, LOW K H. On-line optimization of biomimetic undulatory swimming by an experiment-based approach[J]. Journal of Bionic Engineering, 2014, 11(2): 213–225.

[78] 宋英杰, 王刚, 唐武生, 等. 基于模糊自适应串级 PID 的机器鱼位姿控制 [J/OL]. 控制工程. [2022-12-20]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20210576>. SONG Y J, WANG G, TANG W S, et al. Posture control of robotic fish based on fuzzy self-adaptive cascade PID [J/OL]. Control Engineering of China. [2022-12-20]. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20210576> (in Chinese).

[79] YU J Z, LIU J C, WU Z X, et al. Depth control of a bioinspired robotic dolphin based on sliding-mode fuzzy control method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2429–2438.

[80] WANG S, WANG Y, WEI Q P, et al. A bio-inspired robot with undulatory fins and its control methods[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1): 206–216.

## 相关论文

[1] 鲁挺, 王宁, 王仁慧. 推力受限的 ROV 预设性能精准跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(3): 48–56. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02787>

[2] 张强, 郭高阳, 胡宴才, 等. 状态受限下的水下履带式清淤机器人轨迹跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(3): 57–65. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02720>

[3] 徐鹏飞, 吕韬, 葛彤, 等. 球形水下机器人滚进特性试验与动力学建模分析 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(6): 216–222. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02583>

[4] 罗一汉, 吴家鸣, 周汇锋. 基于 CFD 水动力参数的水下机器人轨迹跟踪控制 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(3): 237–245, 272. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02739>

[5] 陈帅, 王宁, 陈廷凯, 等. 置信检验自适应联邦卡尔曼滤波及其水下机器人组合导航应用 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 203–211, 220. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.02216>

[6] 姚金艺, 曾庆军, 赵强, 等. 全驱动型 AUV 三维路径跟踪控制系统设计及分析 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(6): 22–29. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01520>

[7] 张康, 王磊, 冷文军, 等. 深海爬游机器人多腿位姿对巡游稳定性的影响 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(5): 90–97. <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.01500>