

# 尾鳍驱动型水下机器人发展综述

包海默<sup>1</sup>, 胡晓惠<sup>1\*</sup>, 宋梅萍<sup>2</sup>, 张燕<sup>1</sup>, 孔巧<sup>1</sup>

(1.大连民族大学 设计学院, 辽宁 大连 116600;

2.大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** **目的** 为提高尾鳍驱动型水下机器人的工作效率, 优化尾鳍驱动装置的硬件和软件提供理论支撑。**方法** 将中国知网数据库与 Web of Science 数据库作为研究数据来源, 对相关文献进行系统梳理, 使用 Citespace 和 VOSviewer 软件对文献作者、所属机构、关键词和研究热点进行可视化图谱绘制。**结果** 通过对文献的分析, 确定三个热点研究方向, 分别是尾鳍驱动装置的外形结构设计、驱动方式和控制系统设计、材料设计, 并根据各研究方向提炼出对应的研究方法: 基于设计形态学、结构仿生学和工程优化的外形结构设计方法, 基于自下而上和模块化的驱动方式设计方法, 基于滑模控制、模糊控制和 PID 控制系统设计方法, 以及基于仿生材料、智能材料和计算机模拟的材料设计方法等。**结论** 对目前尾鳍驱动型机器人的主要研究内容、优势特点、存在问题、设计方法和未来趋势进行总结, 为相关领域的发展提供参考和依据。

**关键词:** 尾鳍驱动; 水下机器人; 外形结构设计; 驱动方式设计; 材料设计

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)18-0128-19

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.18.016

## Review on Development of Tail-fin-driven Underwater Vehicles

BAO Hai-mo<sup>1</sup>, HU Xiao-hui<sup>1\*</sup>, SONG Mei-ping<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, KONG Qiao<sup>1</sup>

(1. School of Design, Dalian Minzu University, Liaoning Dalian 116600, China;

2. Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the working efficiency of the tail-fin driven underwater vehicle, and provide theoretical support to optimize the hardware and software of the tail-fin driven device. In this paper, CNKI database and Web of Science database were taken as research data sources, relevant literature was systematically sorted out, and Citespace and VOSviewer software were used to visualize the literature authors, affiliated institutions, keywords and research hotspots. Based on the literature analysis, three hot research directions were determined, which were the shape structure design, driving mode and control system design, and material design of the tail-fin drive device. Corresponding research methods were refined according to different research directions, including the shape structure design method based on design morphology, structural bionics and engineering optimization, and the bottom-up and modular drive mode design method, the control system design method based on sliding mode control, fuzzy control and PID control, and the material design method based on bionic materials, intelligent materials and computer simulation, etc. The main research contents, advantages, existing problems, design methods and future trends of tail-fin driven robots are summarized, which provides reference and basis for the development of related fields.

**KEY WORDS:** tail-fin drive; underwater vehicle; exterior structure design; drive mode design; design of materials

随着世界各国在海洋领域的竞争加剧, 对海洋信息的获取和海洋资源的利用成为关注焦点。水下机器人作

为一种高技术、低成本的科技手段, 可以代替潜水员深入更深、更广的海域, 完成高难度研究任务, 成为目前

海洋开发依赖的主要技术手段<sup>[1]</sup>, 根据是否载人, 可将水下潜航器分为载人水下机器人 (HOV) 和无人水下

机器人, 其中无人水下机器人又可进一步细分为有缆水下机器人 (ROV) 和自动水下机器人 (AUV), 见图 1。

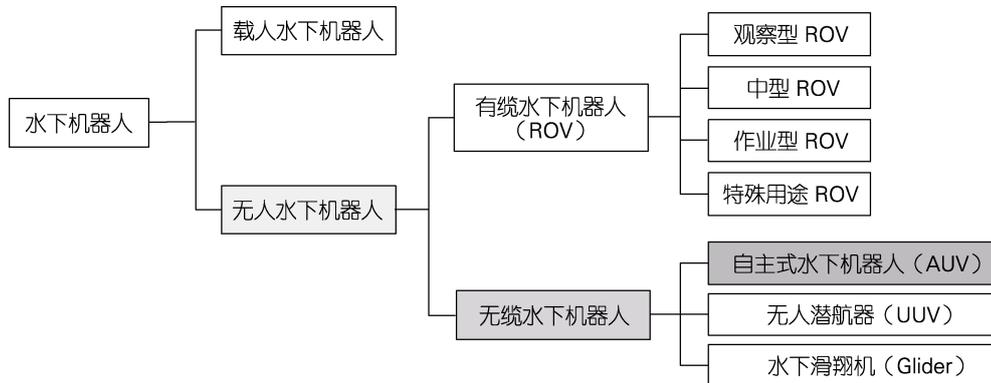


Fig.1 Classification of underwater vehicles

目前, 传统的水下机器人依然存在作业噪声大、工作效率低、环境适应性差等缺点。鱼类等海洋生物通过上亿年进化出了更加适应海洋环境的运动方式和存在模式, 将鱼类等海洋生物在形态结构和运动方式等方面的优势运用到水下机器人的设计中, 具有重要的价值和意义<sup>[2]</sup>。1926 年 Breder<sup>[3]</sup>以鱼类游动形态为标准, 将游动模式划分为鳗鲡模式、尾鳍摆动模式及鳍科模式三种。1978 年, Lindsey 在 Breder 理论的

基础上, 进一步将鱼类推进模式划分为 BCF 模式和 MPF 模式两大类<sup>[4]</sup>, 见图 2。BCF 模式的鱼类通过扭动身体或者摆动尾鳍实现高效率游动<sup>[5]</sup>, 是大部分鱼类采用的巡游模式, 该模式比较典型的生物有金枪鱼、旗鱼和大白鲨等<sup>[6]</sup>。MPF 模式的鱼类利用背鳍、腹鳍、胸鳍和臀鳍的波动达到推进作用, 在低速运动情况下可以保持较高稳定性, 但是速度较慢, 很难实现高速运动及瞬时加速。

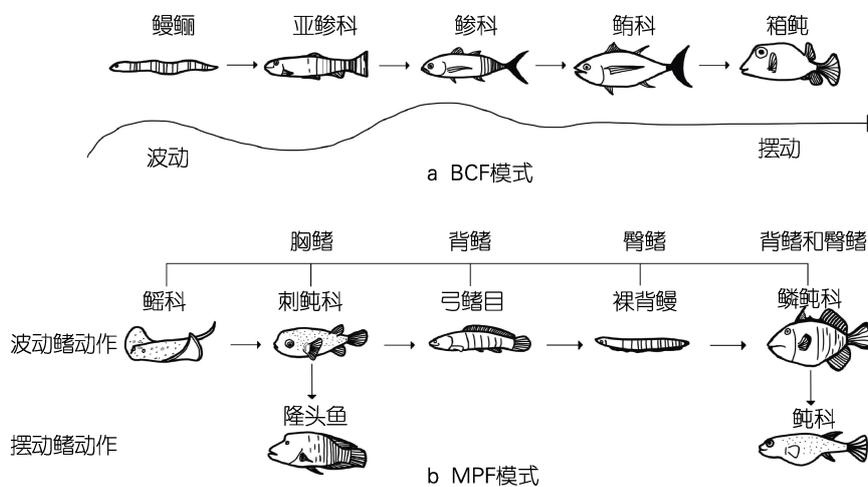


图 2 BCF、MPF 推进模式分类

Fig.2 BCF and MPF promoted classification of modes

随着流体力学、仿生学等学科的发展, 多种采用尾鳍驱动方式的水下机器人相继被研发出来, 并且广泛应用于实际的海底作业中<sup>[7]</sup>。国外的尾鳍驱动型水下机器人以美国和日本为代表, 先后研发了 RoboTuna 和 PF 系列机器人, 国内则从 70 年代开展潜水器的研究工作, 并在 90 年代取得部分研究成果, 典型的代表是可以下潜到 6 000 m 的“CR-01”。随着针对尾鳍驱动型水下机器人研究逐渐增多, 重点逐渐聚焦于通过提高尾鳍的推进效率、灵活性和稳定性来实现水下机器人整体性能的提升。本文通过中国知网和 Web

of Science 筛选目前尾鳍驱动型水下机器人相关的中英文文献, 并对筛选出的文献进行系统分析, 对热点研究内容进行归类, 总结出对应的研究方法, 提出尾鳍驱动型水下机器人的未来发展趋势。

## 1 参考文献来源与分析

### 1.1 参考文献来源

中国知网是全球最大的中国期刊全文数据库, 以收录核心期刊、专业期刊、学术文献、专业电子图书

以及学位论文为主。以 2000 年至 2022 年为区间,通过中国知网检索主题为“机器”+“尾鳍”的期刊、学位论文和会议论文,得到期刊论文为 155 篇,学位论文为 192 篇,会议论文 14 篇,去除与研究内容无关的文献,得到有效样本为 325 篇,包括:期刊论文 143 篇,学位论文 170 篇,会议论文 12 篇,见表 1。

表 1 中国知网相关文献检索结果  
Tab.1 Search results of relevant documents on CNKI

检索词	学术 期刊	学位 论文	会议 论文	筛选后的文献数量			总数
				学术 期刊	学位 论文	会议 论文	
机器+尾鳍	155	192	14	143	170	12	325

Web of Science 是综合性、多学科、核心期刊引文索引的外文数据库,包括三大引文数据库(SCI、SSCI、A&HCI)和两个化学信息事实型数据库(CCR 和 IC)及三个引文数据库(SCIE、CPCI-S、CPCI-SSH),可以在短时间内锁定高影响力的论文,发现国内外权威学者的研究方向和课题发展趋势。以 2000 年至 2022 年为区间,通过 Web of Science 检索主题“Robot caudal fin”词组,得到 142 篇期刊论文,133 篇会议论文,12 篇综述论文,筛选去除与研究无关内容,得到有效样本为 263 篇,包括:期刊论文 132 篇,会议论文 119 篇,综述论文 12 篇,见表 2。

表 2 Web of Science 相关文献检索结果  
Tab.2 Search results of relevant documents on WOS

检索词	期刊 论文	会议 论文	综述 论文	筛选后的文献数量			总数
				期刊 论文	会议 论文	综述 论文	
Robot caudal fin	142	133	12	132	119	12	263

## 1.2 参考文献分析

Citespace 是一款应用于科学文献识别以及领域发展趋势研究的可视化分析软件,通过该软件可以判断某个特定领域的研究热点。它包括四个方面的基本分析,分别是引文与文献发表总数、重点学科和期刊、科研机构和合作情况及发文作者分析,同时也可以对关键词进行聚类 and 突变分析<sup>[8]</sup>。本文通过 Citespace 软件对之前筛选出的中文文献和外文文献分别进行图谱共现分析。首先对中国知网和 Web of Science 得到的文献进行发文数量统计,得到如图 3 的统计图,之后从宏观和微观两个角度对文献进行共现分析<sup>[9]</sup>。

### 1.2.1 宏观分析

1) 对发文作者进行分析。将中国知网及 Web of Science 获得的数据集导入 Citespace 软件中进行作者分析,得到发文作者分析图谱<sup>[10]</sup>,见图 4—5。通过

图 4 分析可知,国内该领域发文数量前五位作者为梁建宏、李宗刚、于凯、王田苗、刘军考,通过聚类分析与统计,得到这些作者的研究方向大致为推进器的机构设计、控制系统设计和材料设计。通过图 5 的分析可知,国外该领域前 10 位高被引作者为 Lauder George, Sfakiotakis Michael, Michael Triantafyllou, Lighthill MJ, Jamie M.Anderson, Esposito Chris J, Chris J Esposito, K.H.Low, Eric D Tytell, Paul W Webb, 并且其中 5 位学者 Sfakiotakis Michael, Chen Zheng, Jamie M.Anderson, Lauder George, KH.Low 的论文属于该领域前 20 高被引文献。

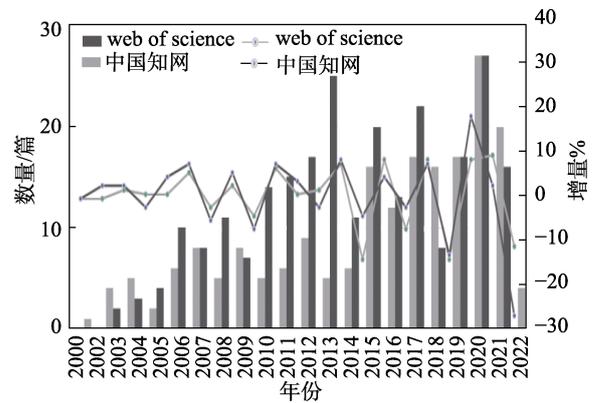


图 3 2000—2022 年发文数量统计  
Fig.3 Statistics of published documents from 2000 to 2022

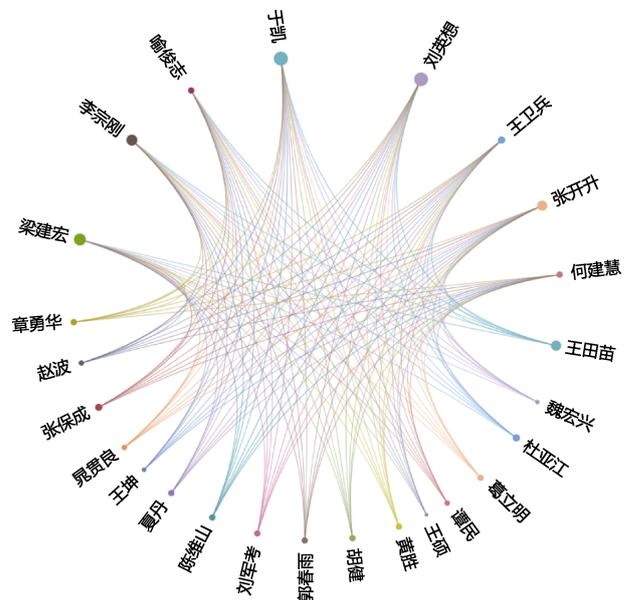


图 4 中国知网发文作者分析图谱  
Fig.4 Analysis atlas of authors of CNKI

2) 对发文机构进行分析。通过对中国知网和 Web of Science 发文机构的数据分析,得到国内外发文作者统计表,见表 3—4。通过表 3 分析可知,国内该领域的发文机构以普通高校为主,排序前五的分别是哈尔滨工程大学、哈尔滨工业大学、兰州交通大学、

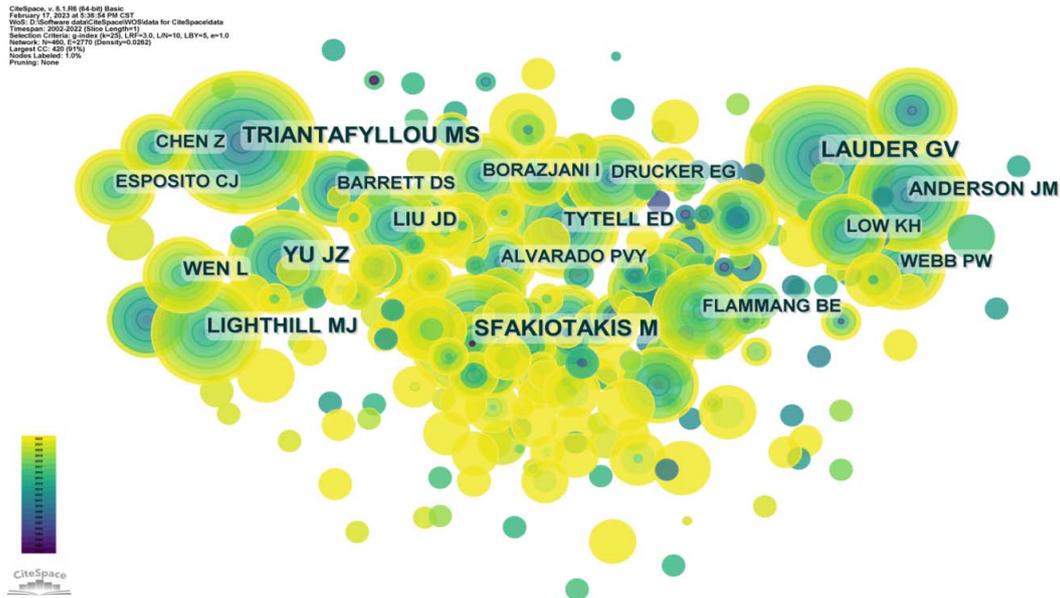


图 5 Web of Science 发文作者共被引分析图谱  
Fig.5 Analysis atlas of WOS article author co-citation

中国科学技术大学、中国海洋大学。通过表 4 分析可知, 国外该领域发文机构集中于美国、新加坡和韩国, 发文最多的机构分别是哈佛大学和新加坡南洋理工大学。此外, 纽约州立大学、密歇根州立大学、休斯顿大学等多个院校在水下机器人领域也有大量的研究成果, 总体上美国在该领域的研究产量远超其他国家, 具有较高的研究地位。

表 3 中国知网发文频次 TOP 5 机构  
Tab.3 TOP 5 organizations with the most frequent publication by CNKI

排序	频次	机构	占比/%
1	29	哈尔滨工程大学	8.9
2	23	哈尔滨工业大学	7.1
3	20	兰州交通大学	6.2
4	13	中国科学技术大学	4.0
5	7	中国海洋大学	2.2

表 4 Web of science 领域发文频次 TOP 5 机构  
Tab.4 TOP 5 organizations with the most frequent publication by WOS

排序	频次	机构	国家
1	17	Harvard University	美国
2	16	Nanyang Technological University	新加坡
3	13	Konkuk University	韩国
4	12	Korea Institute of Machinery and Materials	韩国
5	8	New York University	美国

1.2.2 微观分析

通过 VOSviewer 软件对知网 325 篇文献进行处

理分析, 筛选高于 3 频次的关键词, 进行网络共现图谱分析, 见图 6。在进行网络共现时, 节点圆圈越大, 代表关键词连接强度越高, 并且呈现一定程度的聚类, 例如“机器海豚”和“仿生”“机构设计”和“仿生推进”“水动力”与“数值模拟”。整理出排序前 10 的高频关键词 (见表 5), 并且仿生、机器海豚、水动力和机构设计连接强度较大, 研究热度较高。最后使用 Citespace 软件进行关键词时间线和突现图谱绘制, 得到 9 个主要关键词聚类, 其中包含推进性能、推进效率、驱动机构、数值模拟、尾鳍刚度和仿真, 见图 7。

在 VOSviewer 软件中导入 Web of science 数据, 选择高于 4 频次的关键词, 进行共现网络分析, 见图 8, 筛选后得到 68 个关键词, 其中前 10 次序的高频关键词如表 6 所示, 其中“hydrodynamics”“design”“performance”“propulsion”是高连接强度的热点关键词。将文献数据导入 Citespace 中进行关键词时间线分析, 共得到 9 个聚类 (见图 9), 相同聚类的关键词按照时间分布在同一水平线, 可以看到关键词热点随时间变化情况。

最后利用 Citespace 进行关键词突现分析。通过关键词突现图谱可以得到中国知网在尾鳍推进器领域的热点研究方向为“推进性能”“仿生推进”“柔性尾鳍”“模糊控制” (见图 10), 仿生机器鱼聚类下的热点研究方向为外形仿生和结构仿生。Web of Science 近几年的热点研究方向为“flow visualization”“caudal fin locomotion”“hydrodynamics”“design”, 见图 11。为确保对研究方向和研究方法的精确性, 对相关文献的内容进行精读, 整体分析得到尾鳍驱动型水下机器人的三个研究重要方向, 分别是尾鳍推进机构的外形结构设计、驱动方式和控制系统设计、驱

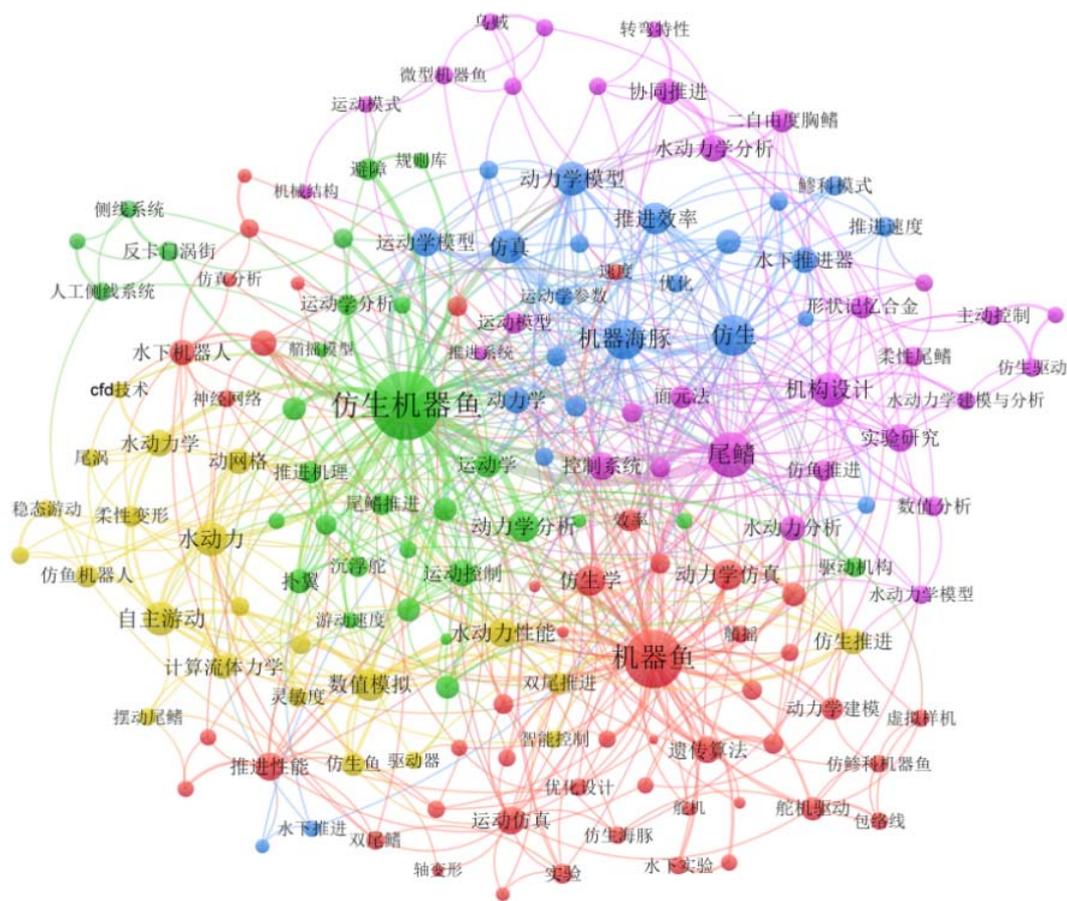


图6 VOSviewer 中国知网关键词共现网络  
Fig.6 VOSviewer keyword co-occurrence network of VOSviewer CNKI

表5 中国知网 TOP 10 高频及高连接关键词  
Tab.5 TOP 10 high frequency and high connection keywords of CNKI

排序	频次	关键词	连接强度	排序	频次	关键词	连接强度
1	23	尾鳍	116	6	9	机构设计	59
2	21	仿生	93	7	10	数值模拟	57
3	18	机器海豚	87	8	12	仿真	56
4	12	水动力	59	9	11	自主游动	56
5	10	动力学模型	59	10	8	推进效率	48

动器材料设计。再针对不同研究方向的文章进行归类整理，得到针对三个研究方向的具体研究方法。

## 2 研究方向

### 2.1 外形结构设计

目前的水下机器人设计研究有两个总体发展趋势，成本高、体积大的水下机器人研究的重点是如何提高其自主航行性能和能力，成本低、体积小的水下机器人研究重点是驱动方式、运动灵活性和协调控制能力<sup>[11]</sup>。由于在不同工作环境中的作业任务和目标不同，导致水下机器人有多种外部形态和内部构造<sup>[12]</sup>。根据不完全统计，世界上有上百种不同的水下机器人，其中以仿鱼型水下机器人具有更多优势，增长速度最

快<sup>[13]</sup>。而尾鳍作为重要的仿生驱动装置，快速摆动时可产生超过 90%的推力，因此通过尾鳍摆动实现驱动的机器鱼是所有仿生机器鱼中运动速度和效率最高的。尾鳍推力的大小主要是由展弦比和后掠角决定，为了提高驱动效率，尾鳍形状和结构的优化是关键步骤。

#### 2.1.1 外形设计

不同鱼类的游动方式和构造不同，尾鳍形状也各不相同<sup>[14]</sup>。根据展弦比不同可以将鱼类尾鳍分为新月形、圆形和深叉形三种类型<sup>[15]</sup>。新月形尾鳍的鱼类大多可实现长时间高速游动，圆形尾鳍的鱼类运动稳定性较好，叉形尾鳍则具有新月形和圆形尾鳍的综合优势，同时摆动灵活。尾鳍驱动型水下机器人的设计目前也以上述三种类型为主。

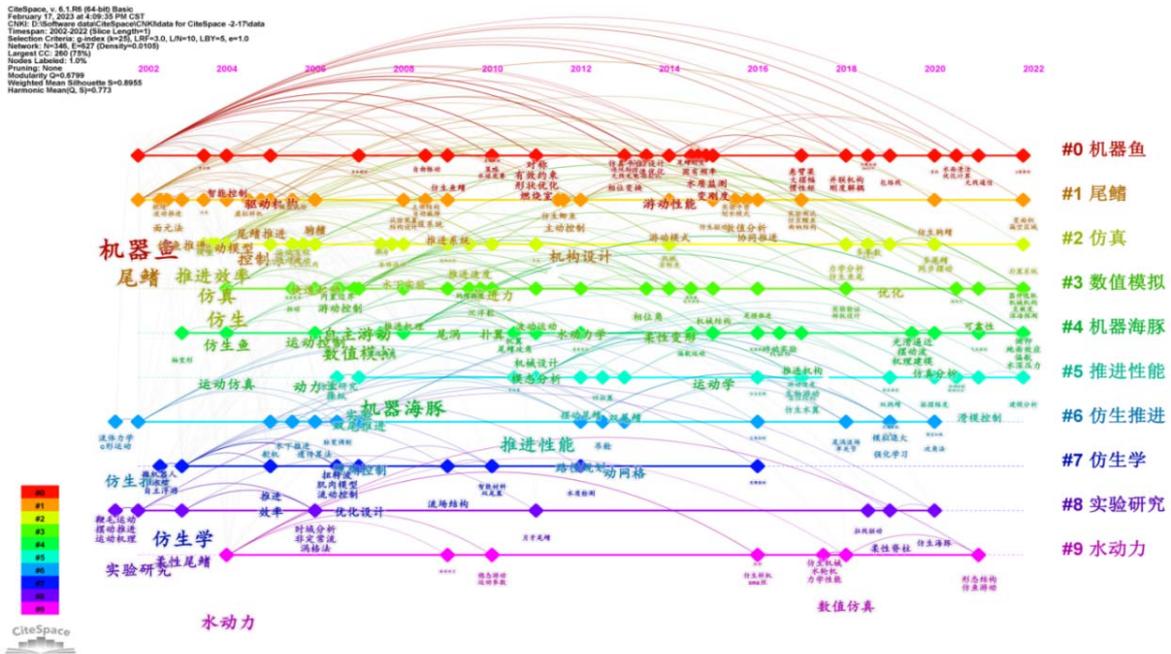


图 7 中国知网文献关键词聚类时间线  
Fig.7 Keyword clustering timeline of CNKI documents

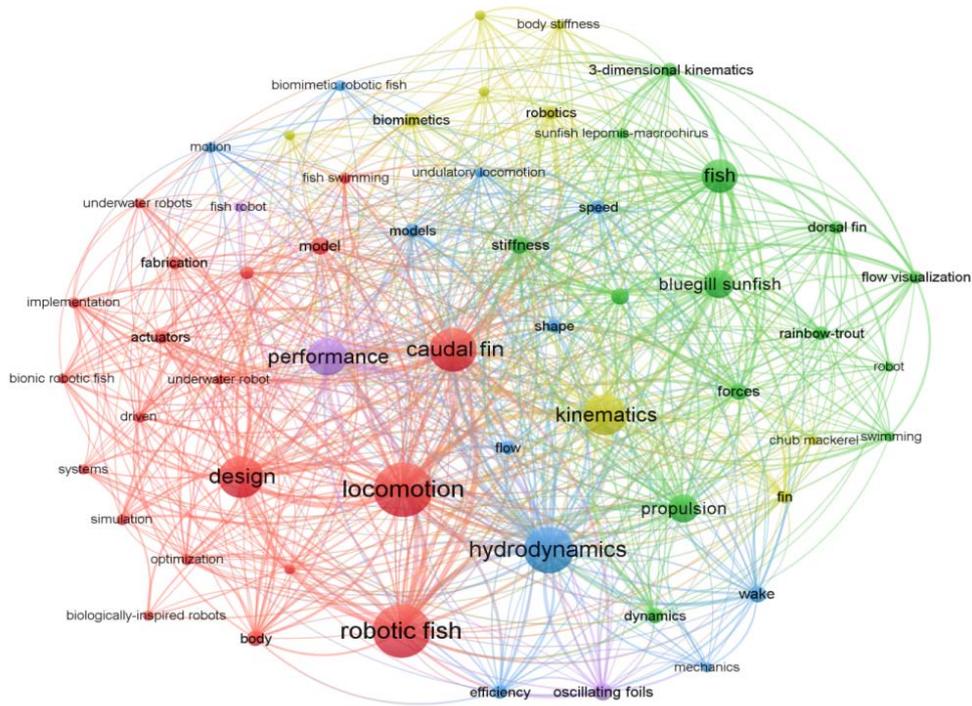


图 8 Web of science 文献关键词聚类  
Fig.8 Keyword clustering of WOS Keyword documents

表 6 Web of science TOP 10 高频及高连接关键词  
Tab.6 TOP 10 high frequency and high connection keywords of WOS

排序	频次	关键词	总连接强度	排序	频次	关键词	总连接强度
1	66	locomotion	270	6	30	performance	160
2	43	caudal fin	207	7	31	kinematics	158
3	42	hydrodynamics	206	8	30	fish	127
4	68	Robotic fish	201	9	21	bluegill sunfish	118
5	42	design	162	10	24	propulsion	115

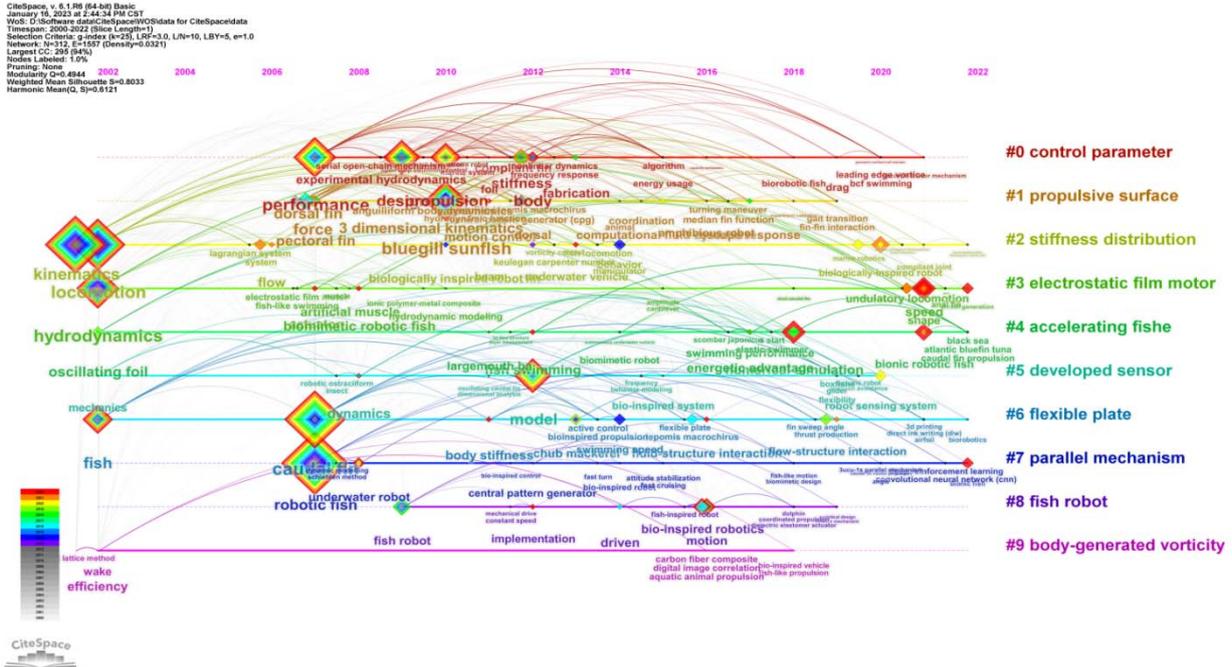


图9 Web of science 文献关键词网络时间线  
Fig.9 Keyword clustering timeline of WOS documents

TOP10 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2002-2022
尾鳍	2002	2.34	2002	2008	[Red bar from 2002 to 2008]
仿鱼推进	2003	2.43	2003	2005	[Red bar from 2003 to 2005]
仿真	2004	2	2004	2006	[Red bar from 2004 to 2006]
双尾推进	2007	2.37	2007	2008	[Red bar from 2007 to 2008]
自主游动	2007	2.74	2010	2015	[Red bar from 2010 to 2015]
运动学	2015	2.67	2015	2017	[Red bar from 2015 to 2017]
推进性能	2011	2.38	2015	2020	[Red bar from 2015 to 2020]
模糊控制	2007	2.74	2019	2020	[Red bar from 2019 to 2020]
路径规划	2012	2.61	2019	2020	[Red bar from 2019 to 2020]
水动力学	2012	2.17	2020	2022	[Red bar from 2020 to 2022]

图10 中国知网文献关键词突现  
Fig.10 Emerging keywords in CNKI documents

TOP10 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2002-2022
wake	2002	2.72	2002	2012	[Red bar from 2002 to 2012]
flow visualization	2007	3.2	2007	2011	[Red bar from 2007 to 2011]
caudal fin locomotion	2007	2.22	2007	2011	[Red bar from 2007 to 2011]
hydrodynamics	2002	3.31	2012	2015	[Red bar from 2012 to 2015]
kinematics	2002	2.46	2013	2015	[Red bar from 2013 to 2015]
pectoral fin	2007	2.16	2016	2018	[Red bar from 2016 to 2018]
rainbow trout	2007	2.11	2016	2017	[Red bar from 2016 to 2017]
design	2009	4.4	2018	2022	[Red bar from 2018 to 2022]
biologically-inspired robot	2020	2.56	2020	2022	[Red bar from 2020 to 2022]
robotic fish	2007	2.56	2020	2022	[Red bar from 2020 to 2022]

图11 Web of Science 文献关键词突现  
Fig.11 Emerging keywords in WOS documents

1) 新月形尾鳍。新月形尾鳍展弦比大, 叶梢尖, 尾柄处收缩明显, 纵向剖面呈现似机翼的形状, 运动过程中的推进摆动集中于尾部。采用该类型尾鳍具有较高的推进力, 能快速实现推进和转向, 同时推进速度会随尾鳍摆动频率和幅度的上升而增大, 目前 BCF 推进模式水下机器人普遍采用该种尾鳍。美国麻省理工学院研制了世界上第一条真正意义上的仿生机器人“RoboTuna”就是采用新月形的尾鳍<sup>[16]</sup>(见图 12a), 解决传统水下机器人在水下工作时间短的限制。并在四年后研制出 RoboTuna 的高阶版“VCUUV”<sup>[17]</sup>(见图 12b), 最大速度可以达到 1.2 m/s (1 Hz), 机动性可实现 75°/s。张曦等<sup>[18]</sup>选取金枪鱼作为仿生对象, 研究新月形尾鳍对推进效率的影响。实验得出, 尾鳍的平均推力系数、输入功率、摆动频率及摆动幅度等参数对推进性能有影响, 并在一定条件下, 推进效率可达到最高值。北京航空航天大学梁建宏等<sup>[19]</sup>和哈尔滨工业大学的刘军考等<sup>[20]</sup>针对大展弦比尾鳍的水下机器人做了实验研究, 前者通过实验证明大展弦比尾鳍的小型机器鱼具有良好的游动性和机动性(见图 12c), 后者运动学模型定义尾鳍运动学参数, 证明两关节比单关节尾鳍具有更高的推进效率。

2) 圆形尾鳍。圆形尾鳍面积大、展弦比小, 稳定性更高, 但灵活性较差, 不适合长时间的快速推进运动。圆形尾鳍机器鱼相较于新月形尾鳍机器鱼抗干扰性更好, 通常被用于比较实验和控制实验中来减小

误差。瑞士联邦理工学院的 Daisy Lachat 研制出一款仿生箱鲀的水下机器人 BoxyBot<sup>[21]</sup>(见图 12d)。该机器鱼通过胸鳍和近似圆形尾鳍的配合, 可在趋光性实验中稳定游动。实验证明采用正弦信号控制的半圆形尾鳍与胸鳍协同推进是一种高效的推进方式。陆军航空兵学院的陈远志等<sup>[22]</sup>将机器鱼尾鳍形状由半月形改变成半圆形, 经过改进后的半圆形尾鳍作用面积增大, 在划水过程中减少边界损失。武汉工程大学的史晓虎基于 BCF 推进模式设计了一款三关节的仿生推进机器鱼<sup>[23]</sup>(见图 12e), 其半圆形尾鳍可使机器鱼的直游性能达到更佳。

3) 叉形尾鳍。叉形尾鳍面积中等, 展弦比中等, 呈深叉形状, 相对新月形尾鳍稳定度更高, 与圆形尾鳍相比灵活性更强, 常用于解决动力学问题和控制系统测算, 典型代表是锦鲤的尾鳍。新加坡科技设计大学的 Tushar Mohan 等设计一款高度模块化、易部署的仿生锦鲤水下机器人“Meta-KOI”<sup>[24]</sup>(见图 12f), 使用包括电缆驱动的叉形尾鳍、伺服电机和微处理器算法来实现运动控制。孟浩锋等<sup>[25]</sup>分析了仿锦鲤柔性尾鳍的受力情况, 表明仿生尾鳍稳定摆动过程中存在着推进和拖拽两种状态。山东大学白发刚等<sup>[26]</sup>设计了一款叉形尾鳍的多关节水下机器人(见图 12g), 解决了多关节水下机器人自主游动过程复杂的动力学精确建模问题, 为进一步研究水下机器人轨迹跟踪问题提供了理论基础。

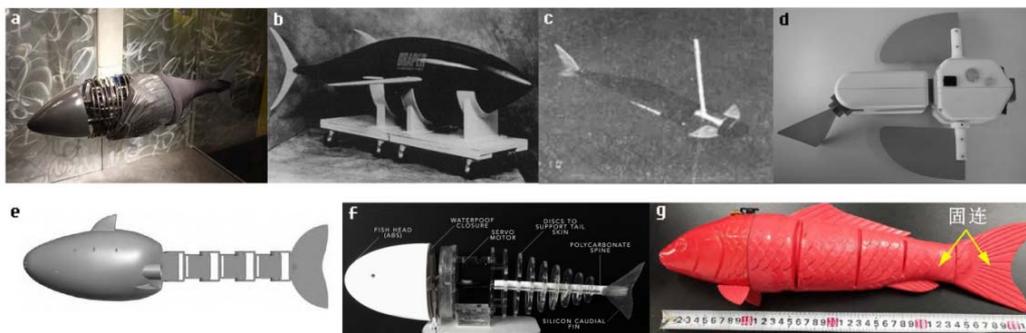


图 12 外形设计水下机器人  
Fig.12 Shape design of the underwater vehicle

### 2.1.2 结构设计

通过对生物肌体构造的研究, 可以构建类似其内部结构原理的机械装置来实现与之相近的功能<sup>[27]</sup>。水下机器人尾鳍的结构设计需要对鱼类尾鳍内部组织结构和运动方式进行模拟<sup>[28]</sup>。目前, 尾鳍结构设计研究热点主要集中在灵活结构和稳定结构两个方面。

1) 灵活结构。灵活结构尾鳍的设计主要通过改变尾鳍的关节数量和采用柔性结构体来实现<sup>[29]</sup>。通常尾鳍关节数量与柔韧性成正比, 关节数量越多灵活度越高。但当关节数量达到一定峰值时, 灵活度不再升高, 稳定性反而下降。柔性结构体通过柔性材料的形

变程度和反弹效果影响尾鳍摆动频率, 进而控制灵活度。日本运输省船舶技术研究所研制的 PF 系列和 UPF 系列水下机器人可用于研究机器鱼在水下运动的基本性能<sup>[30]</sup>。研究表明, 多关节尾鳍灵活性更高, 能实现更多维度的运动, 并且在巡游时更加符合真实鱼游动姿态。武汉工程大学张川等<sup>[31]</sup>设计了一款双关节尾鳍机器鱼(见图 13a), 可以成功进行避障和上浮下潜, 具有较好的低扰动性和灵活性。兰州大学李宗刚等<sup>[32]</sup>设计了一款三关节尾鳍的仿鳕鱼机器人(见图 13b), 灵活度更高, 但仍需要配合胸鳍保持高速运动的稳定性。合肥工业大学侯宁宁<sup>[33]</sup>则建立了一种

四关节的仿生机器鱼模型(见图13c),证明了多关节尾鳍和柔性结构体可以提高水下机器人整体柔韧度。

2) 稳定结构。稳定结构尾鳍的设计主要通过调整尾鳍关节重量在整体中的占比和各种鳍协调控制来实现。增加配重块可使重心前移,从而减少机器鱼头部晃动,保持快速运动时的稳定性。英国埃塞克斯大学研制了G系列仿生机器鱼。其中“fish-G9”仿生机器鱼有四个伺服电机和两个直流电机<sup>[34]</sup>,见图13d。伺服电机驱动尾鳍摆动,直流电机可改变重心

和控制微型泵,实现上浮下潜,帮助机器鱼实现整体的稳定和平衡。中国科学技术大学的周林<sup>[35]</sup>设计制作了一款两自由度尾鳍机器鱼,证明了配重块的添加可以完成整体的稳定性设计。北京航空航天大学研制了SPC系列机器鱼<sup>[36]</sup>,SPC-I具有尾柄和尾鳍两个并联关节,在机器鱼身体前部和后部分别添加了配重块,使得整体下沉时维持平衡。SPC-II解决了鱼体晃动的问题,使尾鳍推进器的运动不受到干扰,见图13e。SPC-III使机器鱼的转弯性能得到了一定的优化,见图13f。

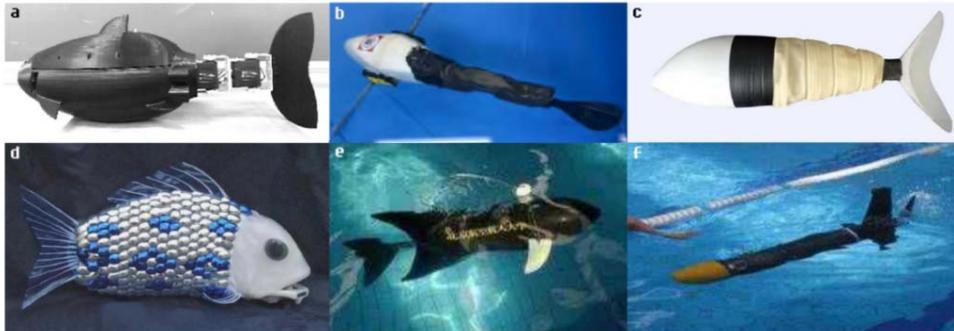


图13 结构设计水下机器人  
Fig.13 Structural design of the underwater vehicle

## 2.2 驱动方式和控制系统设计

传统水下机器人主要通过螺旋桨实现驱动,虽然驱动效果较好,但存在能耗大、效率低、噪声大等问题,作业过程会对生态环境造成影响。围绕尾鳍驱动模式,国内外学者一直寻找新的驱动方式,并尝试设计新型驱动器<sup>[37]</sup>。同时,多数水下机器人的控制过程都需要硬件和软件组成的控制系统参与,硬件和软件系统的配合程度决定水下机器人的整体作业效果<sup>[38]</sup>。

### 2.2.1 驱动方式设计

除了传统的螺旋桨驱动,新型驱动方式主要有电机驱动、液压驱动和气压驱动<sup>[39]</sup>。三种驱动方式各有优缺点,可以实现不同的驱动效果。电机驱动精度高、算法成熟、易于控制,是水下机器人的主要驱动器类型,但结构复杂,难以实现高仿生性和微型化<sup>[40]</sup>。液压驱动和气压驱动方式是通过改变液体和气体的压强实现驱动,但也会带来一定程度的环境问题,所以目前采用电机驱动方式是主流。

1) 电机驱动。电机驱动器作为传统机械驱动器,需要配合齿轮、连杆和多关节舵机等传动装置,并通过减速机构实现机器鱼的关节驱动。电机驱动的机器鱼精度高、便于控制,采用伺服电机的驱动器具有更高的精确度和平衡性。日本运输省船舶技术研究所研制PPF系列机器人证明了电机驱动方式的优势。1998年研制出的“PPF-01”利用双通道无线控制器实现尾鳍控制,见图14a。“PPF-05”采用直流电机驱动尾鳍摆动运动,实现高速度运动,见图14b。“PPF-08”

采用伺服电机控制,实现良好的转向。华中科技大学贺磊<sup>[41]</sup>为解决传统关节电机体积大、能耗大、效率低下的问题,研制了一套无刷直流电机驱动系统,能有效减小运行功耗。海军工程大学成玉强<sup>[42]</sup>设计了一款采用曲柄摇块机构实现单关节尾鳍驱动式机器鱼,见图14c。兰州交通大学葛立明<sup>[43]</sup>设计了一款单关节尾鳍推进机构,将直流电机的旋转运动通过框架、尾部旋转杆转化为尾部的周期性摆动运动,见图14d。

2) 液压驱动。液压驱动方式用水或油等液体为介质,压力泵和电机为驱动元件,通过液体在驱动器内的循环实现驱动。液压驱动系统惯性小、结构简单、可靠性高、性能稳定,也被广泛应用<sup>[44]</sup>。但液压驱动的机器鱼响应速度低于电机驱动、承载和负载能力很大,也会对环境造成一定影响。美国麻省理工的Robert K. Katzschmann等<sup>[45]</sup>设计了一种液压驱动的自主柔性机器人,结合液压驱动系统和软体制造技术,实现了大范围的连续变形,提高了机器人的运动持久性和耐用性,见图14e。日本东京工业大学研制了一款采用液压驱动方式的仿生海豚两关节机器鱼<sup>[46]</sup>,最大速度可以达到1.2m/s,见图14f。中国海洋大学教柳设计了一款液压驱动的两关节柔性机器鱼<sup>[47]</sup>,具有能量转换率高、运动姿态连续的优点,但仍存在下潜深度受限的问题,见图14g。

3) 气压驱动。气压驱动方式用气罐和气泵作为动力元器件,传输气体作用于柔性鱼身,通过鱼体形变产生推力,响应时间快,控制方法简单易实现,但是气压驱动机器鱼精度差,可控性不高。哈佛大学

Michael W ehner 等<sup>[48]</sup>通过催化反应产生的过氧化氢气体为机器人运动提供动力, 设计制作全球首个全软体自主运动机器人 Octobot, 见图 14h。沈阳工业大

学赵冬生以蓝鳍金枪鱼为仿生对象, 设计了一款腔结构气压驱动的硅胶软体机器鱼<sup>[49]</sup>, 同时研究了鱼尾内腔气压对偏转角、偏转距离的影响, 见图 14i。

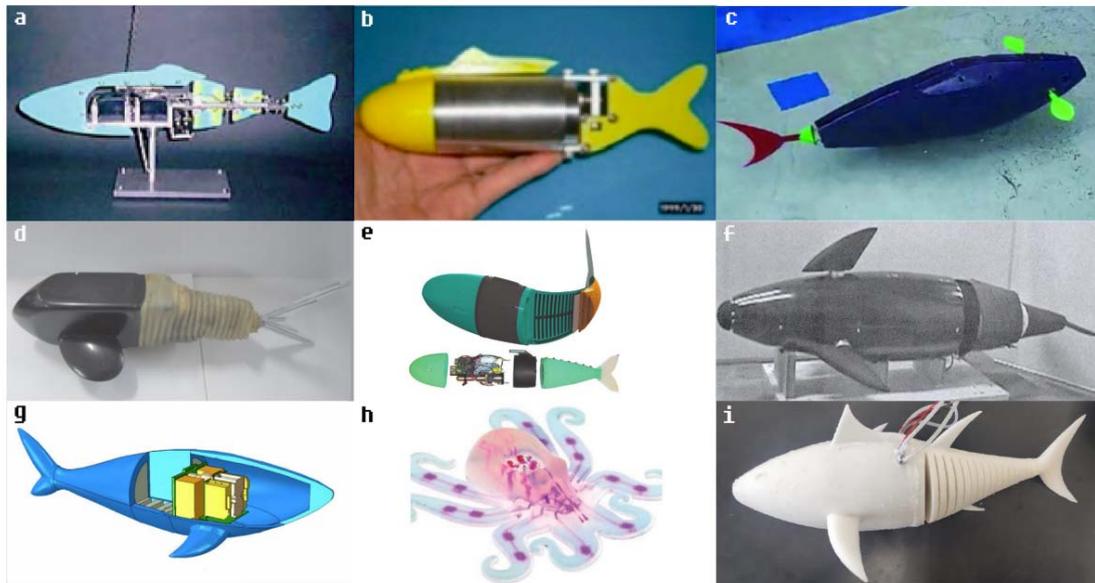


图 14 驱动方式设计水下机器人

Fig.14 Driving mode of the underwater vehicle design

## 2.2.2 控制系统设计

尾鳍驱动方式的水下机器人的直行、转弯和升潜等运动是通过电机驱动尾鳍的摆动来实现<sup>[50]</sup>。一个完整的控制系统包括硬件部分和软件部分。控制系统硬件部分一般包括 5 个部分, 控制模块、电源模块、遥控模块、机械结构模块和传感器模块。控制模块主要控制电机运转带动尾鳍的摆动, 电源模块负责供电、电压转换和报警, 遥控模块的设计要考虑微型、低功耗、高速率三个因素, 机械结构模块是指身体和尾鳍部分骨架的设计, 传感器模块实时感受环境变化, 向控制模块传输运动数据<sup>[51]</sup>。加利福尼亚大学的 Xinyan Deng 等<sup>[52]</sup>介绍了一款尾鳍摆动的厘米级微型机器鱼, 将控制系统硬件部分进行模块化分层设计, 每个模块负责特定的运动任务, 不同层级完成不同的运动任务。软件设计其实就是通过程序设计实现各种运动模式, 包括主程序、子程序、延时子程序及中断服务子程序等。当控制硬件系统模块感受到外界环境变化时, 软件系统需要针对环境数据的变化及时调整策略, 以对抗外界环境的干扰, 保障机器鱼实现较高的运动效率。电子科技大学的陈敏<sup>[53]</sup>对水下助推机器人的控制算法进行了设计和仿真分析, 完成 PID 控制、滑模控制、PID 和滑模混合控制等 4 种控制方法的运动控制器仿真, 并验证了控制算法的可靠性。

## 2.3 驱动器材料设计

目前传统机器鱼采用刚性材料较多, 主要是利用螺旋桨或电机驱动刚性关节, 模拟鱼类尾鳍摆动<sup>[54]</sup>。

优点是动力大、易控制、稳定性高、性能良好, 可以较好地实现推进性能, 缺点是体型和灵活性受限<sup>[55]</sup>。而智能材料驱动器水下机器人能更好实现对鱼类肌肉的模拟, 可以省略铰链、齿轮、关节等传动机构, 在不同的电压下可实现不同程度的弯曲变形, 更接近真实鱼类运动<sup>[56]</sup>。所以对智能化、柔性化的材料研究是未来的趋势。应用于仿生机器鱼驱动器零部件设计上的智能材料主要包括形状记忆合金 (SMA)、电致动聚合物 (EAP) 和压电材料 (PZT)<sup>[57]</sup>。

### 2.3.1 形状记忆合金

形状记忆合金 (SMA) 受到温度或压力发生形变后, 可以在短时间内恢复原状, 并且伸展恢复上百万次也不会发生断裂<sup>[58]</sup>。这种变形再恢复的性能与真实生物体肌肉非常相似, 可以提高鱼在水下执行上述游泳模式时的机动性和控制精度<sup>[59]</sup>, 目前许多水下机器人都已采用 SMA 材料进行驱动器的制作<sup>[60]</sup>。西班牙马德里大学根据鱼类的红色肌肉结构设计了一种基于 SMA 材料的水下机器人<sup>[61]</sup>, 用于模拟在不同 BCF 推进模式下的游动性能, 见图 15a。哈尔滨工业大学杜威采用 V 字形布丝法设计了仿生乌贼水下机器人的推进器<sup>[62]</sup>, 并进行了喷射推进实验, 证明了形状记忆合金可以很大程度上模仿生物的肌肉和运动特性, 为形状记忆合金材料水下机器人的发展提供理论依据。

### 2.3.2 电致动聚合物

电致动聚合物 (EAP) 是一种新型电活性高分子材料, 具有特殊的电性能和机械性能, 能够利用较低

驱动电压达到较快响应速度,被称为“人造肌肉”,很多学者将EPA应用于水下机器人的驱动器设计<sup>[63]</sup>。2003年日本香川大学郭书祥等<sup>[64]</sup>采用两片尺寸为 $0.2\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的电聚合物薄膜作为驱动器,研制了一种可以实现三自由度的运动的微型水下机器人。哈尔滨工程大学苏玉东<sup>[65]</sup>利用多段ICPF材料做驱动器,设计了一款长度小于 $10\text{ cm}$ 的微型水下机器人,大大提高了驱动效率,实验得到最高速度 $36\text{ mm/s}$ ,上浮速度最高 $22\text{ mm/s}$ ,见图15b。

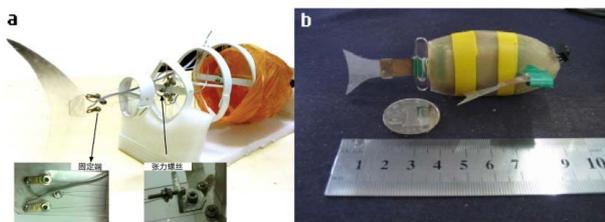


图15 驱动材料设计机器人

Fig.15 An underwater vehicle designed to drive materials

### 2.3.3 压电材料

压电材料(PZT)是一种新型的晶体材料,它在受到压力作用下,两端面的电压差会使材料发生一定程度的机械形变。压电材料可以分为压电晶体、压电陶瓷、压电半导体和有机高分子材料4种。由于压电材料机械强度大、刚度大、温度适应力强、高稳定性和寿命长等优点,通常被应用于水下机器人的驱动器设计中。日本名古屋大学应用PZT材料制作了一款微型双鳍机器鱼的制动器<sup>[66]</sup>,PZT在电压作用下产生的机械形变放大250倍,有效转化为尾鳍的摆动运动。北方工业大学刘世琦<sup>[67]</sup>设计了一款轻量型的压电双尾鳍式微型机器鱼,实验证明压电驱动效率高于其他驱动方式,同时解决了传统机器鱼动作生硬、柔性不足、结构复杂的缺点。

## 3 设计方法

### 3.1 外形结构设计方法

#### 3.1.1 设计形态学方法

设计形态学是将形态学与设计学相结合的一门学科,其研究核心是“形态”,“形”指的是外在轮廓,

“态”指的是内在精神文化,要将形与态统一才能设计出目标对象。水下机器人的尾鳍推进器外形设计可以依托设计形态学方法展开优化设计。基本流程是,提取对象的生物形态特征,获得对象的二维和三维外形元素<sup>[68]</sup>,针对提取的元素进行重建,得到对应的数学和三维模型,通过实验仿真验证设计的合理性<sup>[69]</sup>。设计形态学方法论对尾鳍驱动机构外形创新设计有重要支撑,可以科学实现尾鳍形状的优化,为提高水下机器人整体驱动性能提供可靠路径<sup>[70]</sup>。上海交通大学的胡洁团队<sup>[71]</sup>,对设计形态学的水下机器人研究现状进行梳理,归纳不同类型机器人的设计特点,证明设计形态学在水下机器人领域应用的有效性。大连民族大学模仿蓝斑条尾鱼胸鳍波动方式,使用动态仿生设计方法设计了一款水下观测机器人,通过仿真实验验证了该动态仿生设计方法的有效性<sup>[72]</sup>,见图16a。

#### 3.1.2 结构仿生学方法

结构仿生学方法是指以仿生学为基础<sup>[73]</sup>,通过模仿生物体的整体或部分结构,建造原理类似的机械装置,实现相近功能<sup>[74]</sup>。基本流程是提取生物对象的结构模型,重构和优化该结构模型,通过仿真实验修正和实现与生物动态结构相似的运动效果<sup>[75]</sup>。美国的Christopher J. Esposito<sup>[76]</sup>仿生蓝鳃太阳鱼尾巴结构设计了一款机器人尾鳍。加入了结构性仿生鳍射线的尾鳍,可以产生类似于活鱼尾运动特征的复杂运动,见图16b。

#### 3.1.3 工程优化方法

工程优化设计方法是将计算机作为工具,将工程中的设计问题转化为数学问题,通过科学化调参数精准地向最优解靠拢,得到最优设计方案<sup>[77]</sup>。该方法省时省力,被应用到航空航天、机械工程和汽车铁路等多个领域。尾鳍推进器的工程优化设计流程分三步,首先建立需要的数学模型和动力学模型,然后调整模型中参数值的大小,得到对应的运动曲线和推力大小,最后根据数据选择最优设计方案。Lighthill提出的细长体理论指出展弦比大的新月形尾鳍能提高推进效率<sup>[78]</sup>,应用细长体理论可以计算尾鳍波动下的推进效率。日本东京都立大学的Naoyuki Takesue等<sup>[79]</sup>设计了一款弹性尾鳍的仿生机器鱼,通过工程优化的方法计算出尾鳍形状参数对应的速度差异,探索出更好的尾鳍形状,提高了机器鱼的游泳性能,见图16c。

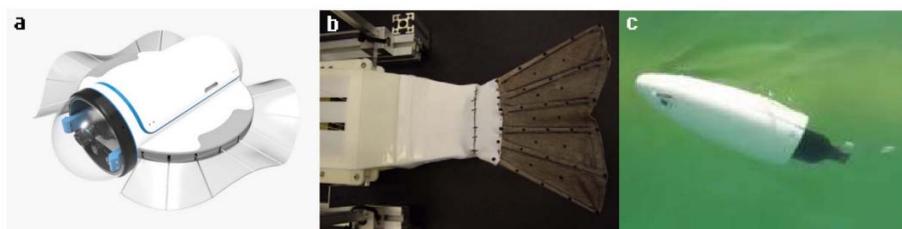


图16 外形结构设计机器人

Fig.16 Shape and structure of underwater vehicle design

## 3.2 驱动方式和控制系统设计方法

### 3.2.1 自下而上方法

“自下而上”的设计方法是一种以零件为中心的建模方法, 该方法注重的是细节的元素或配件设计。水下机器人的尾鳍驱动方式设计更适合采用“自下而上”的设计方法。先找出尾鳍关节需要具备的功能, 从而通过改变关节数带来紧凑的、结构化的设计。自下而上的设计方法可以使设计者更加专注于机器鱼尾鳍本身的机构设计, 使尾鳍推进机构的性能更好、推进效率更高。加拿大维多利亚大学为研究仿生金枪鱼推进效率, 设计完成了两款仿生水下机器人原型<sup>[80]</sup>, 第一个原型从金枪鱼仿生骨骼开始向整体设计延伸(见图 17a), 第二个原型使用伺服电机和旋转关节模仿鱼尾摆动, 从细节逐渐优化到整体, 体现了自下而上设计方法的有效性, 见图 17b。

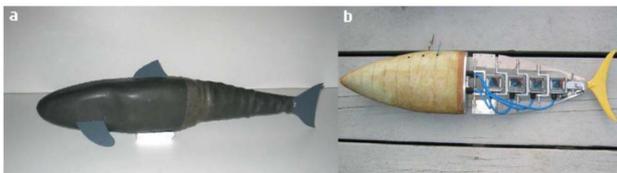


图 17 自下而上设计方法水下机器人

Fig.17 Bottom-up design approach for underwater vehicles

### 3.2.2 模块化方法

模块化设计方法将产品的不同要素组合在一起,

构成具有一定功能的完整系统<sup>[81]</sup>。针对控制系统的模块化设计方法, 是将控制系统分成若干个部分, 每个部分可独立开发测试, 测试完成后, 组装成完整的系统<sup>[82]</sup>。控制系统组装完成后, 需选取合适的控制算法<sup>[83]</sup>, 常见的控制算法有滑模控制算法、模糊控制算法及 PID 控制算法<sup>[84]</sup>。

滑模控制算法主要针对不连续性控制, 具有非线性特点<sup>[85]</sup>。中国科学院的陈洪梅等<sup>[86]</sup>利用自制水下机器人“CR-02”进行实验, 证明了滑模控制算法的优越性(见图 18a)。中国海洋大学的董升亮<sup>[87]</sup>提出一种基于滑模变结构算法的分布式运动控制系统, 并应用于“C-RANGER”, 见图 18b。模糊控制算法是将计算机拟人化, 利用计算机实现人的控制经验, 属于智能控制范畴<sup>[88]</sup>。中国科学院的尹梦舒<sup>[89]</sup>以水下状态检查机器人为研究主体, 设计模糊控制器与 PID 控制器进行对比, 证明了模糊控制技术的高效性, 见图 18c。哈尔滨工程大学的李晔等<sup>[90]</sup>将“微龙-I”型水下机器人应用到水池试验与河湖试验, 得出结论模糊控制方法有效提高了运动控制精度, 见图 18d。PID 控制算法是利用比例积分和微分进行控制的算法<sup>[91]</sup>, 该算法具有原理简单、鲁棒性强和使用面广的优点<sup>[92]</sup>。东华理工大学的万程等<sup>[93]</sup>以遥操作水下机器人为控制对象, 引入航向 PID 控制器进行三次水池试验, 分析证明了航向 PID 控制器的可行性, 见图 18e。广州海洋地质调查局的田烈余等通过六自由度“海马号”水下机器人模型进行仿真模拟, 证明优化后复合 PID 控制器具有更好的控制性能<sup>[94]</sup>, 见图 18f。

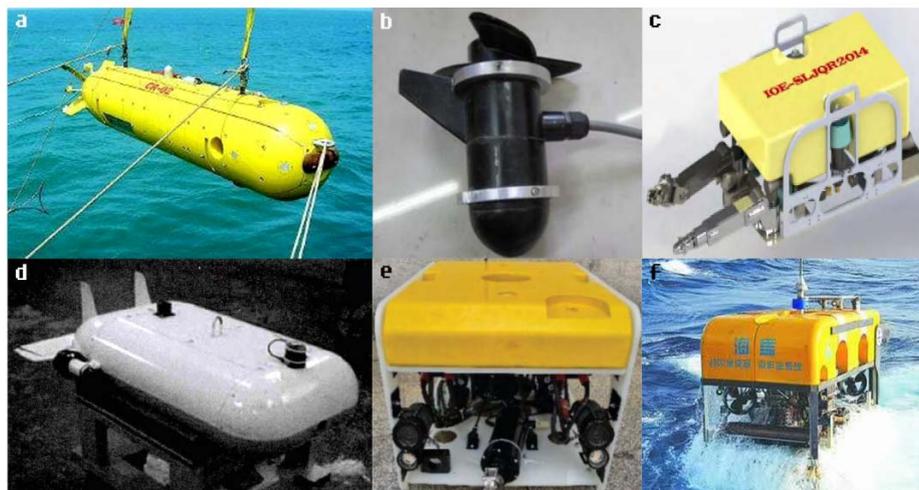


图 18 模块化设计机器人

Fig.18 Modular design of underwater vehicle

## 3.3 驱动器材料设计方法

### 3.3.1 仿生材料方法

仿生材料方法是采用仿生设计学方法, 模拟研制出类似生物表皮或骨骼的材料。首先通过研究生物的内外组织结构, 了解生物的特点和特性, 之后利用

人工材料模拟生物表皮组织结构, 进而实现需要的功能<sup>[95]</sup>。应用于水下机器人表皮设计的仿生材料方法是材料学、生物学、物理学、力学等多个学科融合的产物, 对水下机器人的运动性能提升具有重大意义。中国科学技术大学的章勇华<sup>[96]</sup>以蓝点鲂鱼为仿生对象, 采用 SMA 材料作为弹性鳍条, 乳胶作为鳍面蒙

皮,对波动鳍进行整体设计,提高了波动鳍可控制度和柔软度,见图19a。

### 3.3.2 智能材料方法

智能材料是20世纪90年代快速发展的一种功能性材料,是集感知、驱动和控制于一体的新型材料<sup>[97]</sup>,设计通常需要两种或两种以上的材料进行复合<sup>[98]</sup>。一般来说智能材料由基体材料、敏感材料、驱动材料和信息处理器4个部分组成,多重材料的复合使其拥有更多的功能。智能材料设计中需要根据材料感知的环境变化信息,对系统输入和输出信息进行对比,及时反馈。与传统材料不同,智能驱动材料可以做到连续柔性运动,更好地模拟海洋生物的运动状态<sup>[99]</sup>。采用智能材料进行尾鳍推进机构的设计,可以简化尾鳍的内部结构,为其他硬件装置提供更多的存放空间,并且可以提高机器鱼整体柔性,拓宽了在海洋中的适用范围和下潜深度。智能材料的使用可以帮助水下机器人实现微型化、高柔性、高效率 and 低噪声,但目前智能材料制动器还存在弹性机制利用不足的情况和问题,影响其在水下机器人领域的广泛应用。

### 3.3.3 计算机模拟方法

计算机模拟研究方法是利用计算机程序模拟实际运算过程,根据实验结果选取最优设计方案的方法。水下机器人材料计算机模拟的具体步骤为,先形成水下机器人的数学模型或仿真模型,将收集的材料和模型参数导入计算机进行模拟实验,然后对实验结果进行分析,选取最优参数,确定材料设计方案<sup>[100]</sup>。Bo Liu等<sup>[101]</sup>数值模拟方法研究了5种连杆柔性铰接尾鳍的推进性能,即刚性-刚性情况、中等柔性-中等柔性情况、柔性-柔性情况、刚性-柔性情况和柔性-刚性情况,实验结果表明,中等柔性-中等柔性外壳表现出了惊人的性能。南京航空航天大学的于凯<sup>[102]</sup>设计了一款形状记忆合金驱动的仿生鲫鱼水下机器人,采用数值模拟方法辅助尾鳍设计,获得了加热时间与摆动角度的关系,提高了SMA丝的控制性能,使机器鱼实现了更加精准的控制,见图19b。

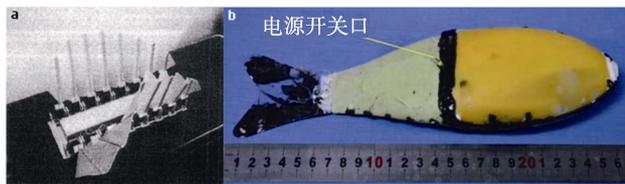


图19 驱动材料设计机器人

Fig.19 An underwater vehicle designed to drive materials

## 4 发展趋势分析

通过分析可以发现,尾鳍驱动型水下机器人的热点研究方向和相关设计方法有一些共同倾向。在生物模拟程度、多类型技术融合及产品全方位智能化等方

面均有明显的趋同性,由此可以判断这些趋势也是该领域未来研究的重点。

1) 仿生程度更逼真。未来尾鳍驱动型水下机器人的外形和结构将更加逼近真实海洋生物的形状和内部构造,能够更大程度实现机器人驱动轨迹与鱼类运动曲线的拟合,有效提高水下机器人的灵活性与高效性。同时,随着专家学者对海洋生物生存机制和运动机理的深入研究,尾鳍驱动装置的仿生优化设计策略也将变得更加多样化,行为仿生设计、生态仿生设计及系统仿生设计等方法也会被广泛应用。哈尔滨工程大学的陈东良<sup>[103]</sup>及麻省理工学院 P. V. Valdivia等<sup>[104]</sup>通过深入研究和模拟鱼类生物特征与推进机理,设计研制了更加逼真的尾鳍驱动装置,为提高水下机器人仿生程度开拓了新的研究思路。

2) 技术融合更紧密。随着基础理论知识的逐渐丰富和多种技术的不断更新,混合控制算法、无线通信技术、微纳传感器技术及云计算技术等尾鳍驱动型水下机器人上逐渐被广泛应用。随着多种技术的紧密融合,尾鳍驱动型水下机器人的性能也会变得更加高效和精准,作业过程中稳定性和安全性也会逐步提升。哈尔滨工程大学的李岳明<sup>[105]</sup>,蒙特雷理工学院的 Juan Antonio Algarín-Pinto<sup>[106]</sup>及俄罗斯的 Zhilenkov A等<sup>[107]</sup>分别从不同的技术融合角度对现有水下机器人的控制算法和控制系统进行整体优化,大幅度提高其综合性能,为水下机器人技术融合提供了新的方法和可能,具有较高的创新性与前瞻性。

3) 智能材料更主流。智能材料可自主改变化学、物理、机械性质,能及时对外部环境变化做出响应,灵活度更高。新型智能柔性材料逐渐成为尾鳍驱动型水下机器人研发和应用的主导性材料,其广泛的应用可以提高机器人在探测、采集和分析过程中的作业效率和精度。但现有智能材料仍存在使用场景受限、控制复杂和推进效率不足的问题。如何突破现有材料局限性,实现柔性 with 刚度并存,是未来尾鳍驱动型水下机器人材料智能化的研究重点。西安交通大学的张鸿健<sup>[108]</sup>与马来西亚吉隆坡大学的 MSAM Nor等<sup>[109]</sup>采用新型智能材料设计制作驱动器,有效提高了水下机器人运动中的灵活性与适应性,为提升水下机器人智能化水平指明了新的方向和可能。

4) 应用领域更广泛。目前尾鳍驱动型水下机器人还主要用于海洋信息探测、海底矿物采集和环境检测等传统任务。但随着其仿生程度越来越高,技术融合和智能化水平的不断提升,尾鳍驱动型水下机器人将逐步介入到更多尖端的研究领域,尤其在军事侦察、深海科考、复杂设备检修等复杂任务中发挥更加积极的作用。

## 5 结语

根据对325篇中文文献,263篇外文文献,共计

588 篇文献的梳理和分析,获得尾鳍驱动机构研究的三个热点方向:外形结构设计、驱动方式和控制系统设计、驱动材料设计,并针对三个研究方向的相关研究方法和未来发展趋势进行了梳理。

尾鳍的外形结构设计方面。利用设计形态学、结构仿生和工程优化的方法,对尾鳍的外部形状和内部结构进行优化设计。不同形状的尾鳍性能不同,新月形尾鳍的水下机器人具有更高的推进效率,圆形和微凹形尾鳍的水下机器人稳定性更好。尾鳍关节数越多,柔性越高,灵活性越好,但随着关节数量的增加尾鳍的稳定性会变弱。

尾鳍的驱动和控制方式设计方面。传统电机驱动的仿生机器鱼已实现了相对较高的游动效率和可控性,但动作生硬、结构复杂,液压/气压驱动机器鱼柔性好,但反应慢,会带来一定的污染。控制系统的硬件和软件设计相互配合,能够实现推进系统在给定运动规律下的运动,选用不同控制算法能达到的控制效果不同。

尾鳍的材料设计方面。传统刚性水下机器人拥有动力大、易操控等优点,可以较好较快实现推进性能,但柔性不足、噪声大限制了其进一步的发展。智能材料的不断发展,使水下机器人打破固有限制,拓展水下机器人的使用范围,成功实现了微型化、高柔性、低噪声和高效率的统一。但智能材料的研制仍不够完善,会有越来越多的研究机构和科学工作者投身其中,实现其更加多样的功能。

目前尾鳍驱动型水下机器人虽然实现了对某些海洋生物的模拟,可完成一些特定类型的水下任务,但仍存在作业精度差、运动灵活度低、工作效率不高等缺点。随着理论研究和综合发展的综合发展,尾鳍驱动型水下机器人会朝向高仿生、多技术和智能化三个重点方向发展,产品系统集成度不断提高,复杂环境的适应能力不断增强,面向未来海洋领域的应用场景也会更加广泛。

#### 参考文献:

- [1] LI Bo, MAO Zhao-yong, SONG Bao-wei, et al. Study on Battery Thermal Management of Autonomous Underwater Vehicle by Bionic Wave Channels with Liquid Cooling[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(9): 13269-13283.
- [2] SALAZAR R, TAYLOR G, KHALID M U, et al. Optimal Design and Energy Harvesting Performance of Carangiform Fish-Like Robotic System[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(7): 075045.
- [3] 王扬威, 于凯, 闫勇程. BCF 推进模式仿生机器鱼的研究现状与发展趋势[J]. 微特电机, 2016, 44(1): 75-80.  
WANG Yang-wei, YU Kai, YAN Yong-cheng. Research Status and Development Trend of Bionic Robot Fish with BCF Propulsion Model[J]. Small & Special Electrical Machines, 2016, 44(1): 75-80.
- [4] LINDSEY C C. Form, Function, And Locomotory Habits in Fish[J]. Fish Physiology, 1978: 1-100.
- [5] SHINTAKE J, CACUCCILOLO V, SHEA H, et al. Soft Biomimetic Fish Robot Made of Dielectric Elastomer Actuators[J]. Soft Robotics, 2018, 5(4): 466-474.
- [6] LOW K H, CHONG C W, ZHOU Chun-lin. Performance Study of a Fish Robot Propelled by a Flexible Caudal Fin[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage, AK, USA. IEEE, 2010: 90-95.
- [7] GAFUROV S A, KLOCHKOV E V. Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Development Tendencies[J]. Procedia Engineering, 2015, 106: 141-148.
- [8] 何修传, 白雷强, 杨晓扬. CNKI 设计叙事研究的文献计量可视化分析[J]. 包装工程, 2023, 44(8): 279-288.  
HE Xiu-chuan, BAI Lei-qiang, YANG Xiao-yang. Visual Analysis on Bibliometrics of Design Narrative Research in CNKI[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(8): 279-288.
- [9] AZAM A, AHMED A, WANG Hao, et al. Knowledge Structure and Research Progress in Wind Power Generation (WPG) from 2005 to 2020 Using CiteSpace Based Scientometric Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 295: 126496.
- [10] WANG Wei-hong, LU Chang. Visualization Analysis of Big Data Research Based on Citespace[J]. Soft Computing, 2020, 24(11): 8173-8186.
- [11] 孟令帅, 林扬, 郑荣, 等. 模块化自主水下机器人的机械设计与实现[J]. 机器人, 2016, 38(4): 395-401.  
MENG Ling-shuai, LIN Yang, ZHENG Rong, et al. Mechanical Design and Implementation of a Modular Autonomous Underwater Vehicle[J]. Robot, 2016, 38(4): 395-401.
- [12] YUH J. Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey[J]. Autonomous Robots, 2000, 8(1): 7-24.
- [13] KIM E, YOUM Y. Design and Dynamic Analysis of Fish Robot: PoTuna[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. New Orleans: IEEE, 2004: 4887-4892.
- [14] WIGUNA T, HEO S, PARK H C, et al. Design and Experimental Parameteric Study of a Fish Robot Actuated by Piezoelectric Actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(6): 751-758.
- [15] 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.
- [16] ANDERSON J M, CHHABRA N K. Maneuvering and

- Stability Performance of a Robotic Tuna[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42(1): 118-126.
- [17] Anderson J M, Kerrebrock P A. The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV)-An autonomous vehicle employing fish swimming propulsion and maneuvering[C]// *International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*. Manchester: University of New Hampshire-Marine Systems, 1997: 189-195.
- [18] 张曦, 苏玉民, 王兆立. 尾鳍形状对摆动尾鳍推进性能的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(2): 296-300.  
ZHANG Xi, SU Yu-min, WANG Zhao-li. The Effects of Caudal Fin Shape on the Propulsion Performance of Flapping Caudal Fin[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(2): 296-300.
- [19] 梁建宏, 王田苗, 魏洪兴等. 水下仿生机器鱼的研究进展 II—小型实验机器鱼的研制[J]. *机器人*, 2002(3): 234-238.  
LIANG Jian-Hong, WANG Tian-miao, WEI Hong-xing. Research Development of Underwater Robotfish II-Development of A Small Experimental Robotfish[J]. *Robot*, 2002(3): 234-238.
- [20] 刘军考, 陈维山, 陈在礼. 尾鳍的形状与运动参数对推进速度的影响[J]. *高技术通讯*, 2001(4): 86-88.  
LIU Jun-kao, CHEN Wei-shan, CHEN Zai-li. The Effect of Caudal Fin's Shape and Motion Parameters on Propulsion Velocity[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2001(4): 86-88.
- [21] LACHAT D, CRESPI A, IJSPEERT A J. BoxyBot: A Swimming and Crawling Fish Robot Controlled by a Central Pattern Generator[C] // *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2006. *BioRob*. Pisa, Italy. IEEE, 2006: 643-648.
- [22] 陈远志, 李卫京. 半圆形尾鳍机器鱼在水球竞赛中的点到点路径规划算法[J]. *兵工自动化*, 2010, 29(11): 66-69.  
CHEN Yuan-zhi, LI Wei-jing. Point-to-Point Strategy in Polo Competition for Robot Fish with Hemicycle Tale Fin[J]. *Ordnance Industry Automations*, 2010, 29(11): 66-69.
- [23] 史晓虎, 文小玲. 仿生机器鱼的运动学建模及控制参数的优化[J]. *自动化与仪表*, 2022, 37(9): 20-24.  
SHI Xiao-hu, WEN Xiao-ling. Kinematics Modeling and Control Parameter Optimization of Bionic Robot Fish[J]. *Automation & Instrumentation*, 2022, 37(9): 20-24.
- [24] MOHAN T, SALMAN A A, SALIM I T. Modular Autonomous Robotic Fish[C]// *2014 Oceans - St. John's*. St: IEEE, 2015: 1-6.
- [25] 孟浩锋, 杨依领, 娄军强等. 压电宏纤维驱动的仿生尾鳍微推进力测量系统[J]. *振动. 测试与诊断*, 2021, 41(02): 311-318.  
MENG Hao-feng, YANG Yiling, LOU Junqiang, et al. Cantilever Micro Thrust Measurement System of Flexible Biomimetic Fin Actuated by Macro Fiber Composites[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(2): 311-318.
- [26] 白发刚, 薛钢, 黄健堃, 等. 仿生机器鱼水动力学与机构动力学耦合建模研究[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(9): 46-56.  
BAI Fa-gang, XUE Gang, HUANG Jian-kun, et al. Coupling Modeling of Hydrodynamics and Mechanism Dynamics of Bionic Robot Fish[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(9): 46-56.
- [27] RAJ A, THAKUR A. Fish-Inspired Robots: Design, Sensing, Actuation, and Autonomy—A Review of Research[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(3): 031001.
- [28] EL DAOU H, SALUMÄE T, CHAMBERS L D, et al. Modelling of a Biologically Inspired Robotic Fish Driven by Compliant Parts[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(1): 016010.
- [29] FARIDEDDIN MASOOMI S, GUTSCHMIDT S, CHEN Xiao-qi, et al. The Kinematics and Dynamics of Undulatory Motion of a Tuna-Mimetic Robot[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, 12(7): 83.
- [30] 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 Jun-zhi, CHEN Er-kui, WANG Shuo, et al. Research Evolution and Analysis of Biomimetic Robot Fish[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(4): 485-491.
- [31] 张川, 喻盈, 黄晨华, 等. 一种双关节舵机驱动的水质监测仿生机器鱼三维避障方法[J]. *自动化与仪表*, 2021, 36(6): 43-48.  
ZHANG Chuan, YU Ying, HUANG Chen-hua, et al. Three-Dimensional Obstacle Avoidance Method of Bionic Robot Fish Driven by Double-Joint Steering Gear for Water Quality Monitoring[J]. *Automation & Instrumentation*, 2021, 36(6): 43-48.
- [32] 李宗刚, 徐卫强, 王文博等. 机器鳕鱼胸鳍/尾鳍协同推进直线游动动力学建模与实验研究[J]. *船舶力学*, 2017, 21(5): 513-527.  
LI Zong-gang, XU Wei-qiang, WANG Wen-bo. Dynamic Modeling and Experimental Research on the Linear Swimming of A Biomimetic Cod Fish Driven by Pectoral Fin With Two Degrees of Freedom and Flexible Body[J]. 2017, 21(5): 513-527.
- [33] 侯宁宁. 多关节仿生机器鱼设计及其路径规划研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.  
HOU Ning-ning. Research on Design and Path Planning of Multi-joint Bionic Robot Fish[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.

- [34] HU Huo-sheng, LIU Jin-dong, DUKES I, et al. Design of 3D Swim Patterns for Autonomous Robotic Fish[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China. IEEE, 2007: 2406-2411.
- [35] 周林. 一种新型尾鳍推进的机器鱼设计与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.  
ZHOU Lin. Design and Experimental Study of a New Robot Fish Propelled by Tail Fin[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [36] 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 An-yi, LIU Gui-jie, WANG Xin-bao, et al. Development and Analysis of Body and/or Caudal Fin Biomimetic Robot Fish[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 137-146.
- [37] DURAISAMY P, KUMAR SIDHARTHAN R, NAGARAJAN SANTHANAKRISHNAN M. Design, Modeling, and Control of Biomimetic Fish Robot: A Review[J]. Journal of Bionic Engineering, 2019, 16(6): 967-993.
- [38] SHAARI M F, ZAHURIN S, ABU BAKAR M E, et al. Design Consideration of Bio-Inspired Contractible Water-Jet Propulsor for Mini Autonomous Underwater Robot[J]. Advanced Materials Research, 2012, 463-464: 1583-1588.
- [39] SITORUS P E, NAZARUDDIN Y Y, LEKSONO E, et al. Design and Implementation of Paired Pectoral Fins Locomotion of Labriform Fish Applied to a Fish Robot[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(1): 37-45.
- [40] SU Zong-shuai, YU Jun-zhi, TAN Min, et al. Implementing Flexible and Fast Turning Maneuvers of a Multijoint Robotic Fish[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(1): 329-338.
- [41] 贺磊, 徐国华, 刘亚平. 水下机器人关节电机驱动系统研究[J]. 机电工程, 2013, 30(1): 77-80.  
HE Lei, XU Guo-hua, LIU Ya-ping. Study of Drive Systems on Underwater Robot Joint Motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(1): 77-80.
- [42] 成玉强, 帅长庚. 单关节尾鳍驱动式机器鱼的运动分析与仿真[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(6): 7-14.  
CHENG Yu-qiang, SHUAI Chang-geng. Kinematic Analysis and Simulation of the One-Link and Fin-Driven Robot Fish[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(6): 7-14.
- [43] 葛立明, 李宗刚, 王琦山, 等. 水下滑翔机器鱼机构设计与运动性能分析[J]. 船舶力学, 2020, 24(1): 31-40.  
GE Li-ming, LI Zong-gang, WANG Qi-shan, et al. Mechanism Design and Motion Performance Analysis of an Underwater Gliding Robotic Fish[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(1): 31-40.
- [44] 徐海军. 液压驱动波动鳍仿生推进器关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.  
XU Hai-jun. Research on Key Technologies of Bionic Propeller Driven by Hydraulic Wave Fin[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [45] KATZSCHMANN R K, MARCHESE A D, RUS D. Hydraulic Autonomous Soft Robotic Fish for 3D Swimming[M]//Hsieh M, Khatib O, Kumar V. Experimental Robotics. Cham: Springer, 2016: 405-420.
- [46] NAKASHIMA M, TOKUO K, KAMINAGA K, et al. Experimental Study of a Self-Propelled Two-Joint Dolphin Ro-Bot[C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. California: ISOPE, 1999: 179.
- [47] 教柳, 张保成, 张开升, 等. 两关节压力驱动柔性仿生机器鱼的设计与仿真[J]. 力学学报, 2020, 52(3): 817-827.  
JIAO Liu, ZHANG Bao-cheng, ZHANG Kai-sheng, et al. Design and Simulation of two-Joint pressure-Driven Soft Bionic Fish[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(3): 817-827.
- [48] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, et al. An Integrated Design and Fabrication Strategy for Entirely Soft, Autonomous Robots[J]. Nature, 2016, 536(7617): 451-455.
- [49] 赵冬生. 软体仿金枪鱼机器人的设计与实现[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.  
ZHAO Dong-sheng. Design and Implementation of Soft Tuna Imitation Robot[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [50] 戴坡. 仿生机器鱼的控制系统设计实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
DAI Po. Design and Experimental Study on Control System of Bionic Robot Fish[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [51] ANTONELLI G, CHIAVERINI S, SARKAR N, et al. Adaptive Control of an Autonomous Underwater Vehicle: Experimental Results on ODIN[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(5): 756-765.
- [52] DENG Xin-yan, AVADHANULA S. Biomimetic Micro Underwater Vehicle with Oscillating Fin Propulsion: System Design and Force Measurement[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona, Spain. IEEE, 2006: 3312-3317.
- [53] 高家葵. 水下助推机器人控制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
GAO Jia-kui. Research on Control Method of Underwater Booster Robot[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

- [54] APALKOV A, FERNÁNDEZ R, FONTAINE J G, et al. Mechanical Actuator for Biomimetic Propulsion and the Effect of the Caudal Fin Elasticity on the Swimming Performance[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 178: 164-174.
- [55] 潘愈康, 王文格, 肖振乾. 伺服驱动凸轮滑块分离装置联合仿真研究[J]. *包装工程*, 2016, 37(17): 150-156. PAN Yu-kang, WANG Wen-ge, XIAO Zhen-qian. Electromechanical Co-Simulation of Servo Drive Cam-Slider Separation Device[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(17): 150-156.
- [56] YE Xiu-fen, SU Yu-dong, GUO Shu-xiang. A Centimeter-Scale Autonomous Robotic Fish Actuated by IPMC Actuator[C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Sanya, China. IEEE, 2008: 262-267.
- [57] 刘贵杰, 刘展文, 田晓洁, 等. 智能材料在水下仿生机器人驱动中的应用综述[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(3): 114-120. LIU Gui-jie, LIU Zhan-wen, TIAN Xiao-jie, et al. A Review of the Application of Intelligent Materials in Underwater Biomimetic Robot[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(3): 114-120.
- [58] 范国超, 王格格, 陈姿含, 等. 形状记忆聚合物的研究与发展[J]. *包装工程*, 2020, 41(13): 124-130. FAN Guo-chao, WANG Ge-ge, CHEN Zi-han, et al. Research and Development of Shape Memory Polymers[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(13): 124-130.
- [59] CHO K J, HAWKES E, QUINN C, et al. Design, Fabrication and Analysis of a Body-Caudal Fin Propulsion System for a Microrobotic Fish[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA. IEEE, 2008: 706-711.
- [60] KIM H J, SONG S H, AHN S H. A Turtle-Like Swimming Robot Using a Smart Soft Composite (SSC) Structure[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(1): 014007.
- [61] ROSSI C, COLORADO J, CORAL W, et al. Bending Continuous Structures with SMAs: A Novel Robotic Fish Design[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011, 6(4): 045005.
- [62] 杜威. SMA 驱动的仿乌贼喷射推进器原型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. DU Wei. Prototype Study of Squid-Like Jet Propeller Driven by SMA[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [63] SUNKARA V, CHAKRAVARTHY A, YI Xiong-feng, et al. Cooperative Optimal Collision Avoidance Laws for a Hybrid-Tailed Robotic Fish[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(4): 1569-1578.
- [64] GUO Shu-xiang, FUKUDA T, ASAKA K. A New Type of Fish-Like Underwater Microrobot[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2003, 8(1): 136-141.
- [65] 苏玉东. ICPF 智能材料驱动的仿生微型机器鱼的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012. SU Yu-dong. Research on Bionic Micro Robot Fish Driven by Icpf Intelligent Materials[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [66] FUKUDA T, KAWAMOTO A, ARAI F, et al. Mechanism and Swimming Experiment of Micro Mobile Ro-Bot in Water[C]// Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1994: 814-819.
- [67] 刘世琦. 压电双尾鳍式微型机器鱼动力学分析研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2021. LIU Shi-qi. Dynamic Analysis of Piezoelectric Double Tail Fin Micro Robot Fish[D]. Beijing: North China University of Technology, 2021.
- [68] 许永生, 赵秦琨, 支锦亦, 等. 基于生物形态简化优化法的产品仿生设计研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(18): 188-193. XU Yong-sheng, ZHAO Qin-kun, ZHI Jin-yi, et al. Product Bionic Design Based on Simplified Optimization Method of Biological Form[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(18): 188-193.
- [69] 胡红忠, 孟永刚, 赵军. 源于海洋动物形体特征研究的仿生设计[J]. *包装工程*, 2008, 29(12): 240-241, 266. HU Hong-zhong, MENG Yong-gang, ZHAO Jun. Bionic Design from Physical Characteristics of Marine Animals[J]. *Packaging Engineering*, 2008, 29(12): 240-241, 266.
- [70] CORUCCI F, CALISTI M, HAUSER H, et al. Novelty-Based Evolutionary Design of Morphing Underwater Robots[C]// Proceedings of the 2015 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Madrid, Spain. New York: ACM, 2015: 145-152.
- [71] 马进, 胡洁, 朱国牛, 等. 基于设计形态学的军事仿生机器人研究现状与进展[J]. *包装工程*, 2022, 43(4): 1-11. MA Jin, HU Jie, ZHU Guo-niu, et al. Research Status and Progress of Military Bionic Robot Based on Design Morphology[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(4): 1-11.
- [72] 包海默, 赵天琦, 冯鸣, 等. 水下观测机器人推进器的动态结构仿生设计研究[J]. *包装工程*, 2023, 44(2): 41-47. BAO Hai-mo, ZHAO Tian-qi, FENG Ming, et al. Research on Bionic Design of Dynamic Structure of Underwater Observation Robot Propeller[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(2): 41-47.
- [73] 马泽群, 苟锐, 黄强苓. 仿生设计在工业设计领域的困境及策略[J]. *包装工程*, 2013, 34(20): 111-113, 128. MA Ze-qun, GOU Rui, HUANG Qiang-ling. Dilemma

- and Strategy of the Bionic in Design the Industrial Design Field[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(20): 111-113, 128.
- [74] 包海默, 李京浩, 冯鸣, 等. 小型自主式水下机器人驱动装置悬停功能仿生设计[J]. 机械设计, 2022, 39(8): 129-135.  
BAO Hai-mo, LI Jing-hao, FENG Ming, et al. Bionic Design on Hovering Function of Small Autonomous Underwater Vehicle Driving Device[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(8): 129-135.
- [75] 包海默, 马宏宇, 乔松, 等. 水下捕捞机器人耐压舱仿生造型设计[J]. 机械设计, 2022, 39(5): 135-141.  
BAO Hai-mo, MA Hong-yu, QIAO Song, et al. Bionic Modeling Design of Compressive Cabin of Underwater Fishing Vehicle[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(5): 135-141.
- [76] ESPOSITO C J, TANGORRA J L, FLAMMANG B E, et al. A Robotic Fish Caudal Fin: Effects of Stiffness and Motor Program on Locomotor Performance[J]. Journal of Experimental Biology, 2012, 215(1): 56-67.
- [77] LOW K H, ZHOU Chun-lin, ZHONG Yu. Gait Planning for Steady Swimming Control of Biomimetic Fish Robots[J]. Advanced Robotics, 2009, 23(7-8): 805-829.
- [78] LIGHTHILL M J. Hydromechanics of Aquatic Animal Propulsion[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1969, 1: 413 - 446.
- [79] TAKESUE N, HATA Y, SEKIYA T. Development of Fish - like Robot with Elastic Fin[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2011, 38(3): 252-257.
- [80] SULEMAN A. Studies on Hydrodynamic Propulsion of a Biomimetic Tuna[J]. Underwater vehicles(Ed.AV In-zartsev), 2008, 41: 459-486.
- [81] KOPMAN V, PORFIRI M. Design, Modeling, and Characterization of a Miniature Robotic Fish for Research and Education in Biomimetics and Bioinspiration[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(2): 471-483.
- [82] KELASIDI E, KOHL A M, PETERSEN K Y, et al. Experimental Investigation of Locomotion Efficiency and Path-Following for Underwater Snake Robots with and without a Caudal Fin[J]. Annual Reviews in Control, 2018, 46: 281-294.
- [83] NAKASHIMA M, OHGISHI N, ONO K. A Study on the Propulsive Mechanism of a Double Jointed Fish Robot Utilizing Self-Excitation Control[J]. JSME International Journal Series C, 2003, 46(3): 982-990.
- [84] GUERRERO J, TORRES J, CREUZE V, et al. Adaptive Disturbance Observer for Trajectory Tracking Control of Underwater Vehicles[J]. Ocean Engineering, 2020, 200: 107080.
- [85] LONDHE P S, DHADEKAR D D, PATRE B M, et al. Uncertainty and Disturbance Estimator Based Sliding Mode Control of an Autonomous Underwater Vehicle[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2017, 5(4): 1122-1138.
- [86] 陈洪海, 李一平. 滑模模糊控制应用于自治水下机器人的实验研究[J]. 控制与决策, 2002, 17(S1): 788-790, 794.  
CHEN Hong-hai, LI Yi-ping. Sliding Mode Fuzzy Control on AUV[J]. Control and Decision, 2002, 17(S1): 788-790.
- [87] 董升亮. 自主式水下机器人的滑模变结构控制研究与仿真[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.  
DONG Sheng-liang. Research and Simulation of Sliding Mode Variable Structure Control for Autonomous Underwater Vehicle[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [88] 熊新国, 郝军, 刘拥军. 基于双模糊 PID 的枕式包装机材料供送速度控制方法[J]. 包装工程, 2021, 42(17): 255-260.  
XIONG Xin-guo, HAO Jun, LIU Yong-jun. Control Method of Material Supply Speed of Pillow Packing Machine Based on Double Fuzzy PID[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(17): 255-260.
- [89] 尹梦舒, 冯常. 基于模糊技术的水下机器人运动控制[J]. 微型机与应用, 2015, 34(17): 75-77.  
YIN Meng-shu, FENG Chang. Motion Control of Underwater Vehicle Based on Fuzzy Technology[J]. Microcomputer & Its Applications, 2015, 34(17): 75-77.
- [90] 李晔. 微小型水下机器人运动控制技术[D]. 哈尔滨工程大学, 2008.  
LI Yie. Research on Motion Control Technology for Mini Underwater Vehicle[D]. Harbin Engineering University, 2008.
- [91] GUERRERO J, TORRES J, CREUZE V, et al. Saturation Based Nonlinear PID Control for Underwater Vehicles: Design, Stability Analysis and Experiments[J]. Mechatronics, 2019, 61: 96-105.
- [92] 范增华, 高军, 李长涛. 基于神经网络的墨量控制算法的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 28-31.  
FAN Zeng-hua, GAO Jun, LI Chang-tao. Study of Ink Control Algorithm Based on Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 28-31.
- [93] 万程, 周焕银, 刘国权. 基于 PID 控制器的遥操作水下机器人航向运动研究[J]. 机电工程技术, 2022, 51(5): 108-111.  
WAN Cheng, ZHOU Huan-yin, LIU Guo-quan. Research on Heading Motion of Remotely Operated Underwater Vehicle Based on PID Controller[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(5): 108-111.
- [94] 田烈余, 周锋, 张培豪, 等. 液压推进型水下机器人的运动控制方法研究[J]. 机电工程, 2018, 35(7): 694-697.

- TIAN Lie-yu, ZHOU Feng, ZHANG Pei-hao, et al. Motion Control Method of Underwater Vehicle with Hydraulic Thrusters[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(7): 694-697.
- [95] MOJARRAD M, SHAHINPOOR M. Biomimetic Robotic Propulsion Using Polymeric Artificial Muscles[C]//*Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. Albuquerque, NM, USA. IEEE, 2002: 2152-2157.
- [96] 章永华. 柔性仿生波动鳍推进理论与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.  
ZHANG Yong-hua. Theoretical and Experimental Study on Propulsion of Flexible Bionic Wave Fin[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [97] 郭健, 潘彬彬, 崔维成, 等. 基于智能材料的深海执行器及海洋仿生机器人研究综述[J]. *船舶力学*, 2022, 26(2): 301-313.  
GUO Jian, PAN Bin-bin, CUI Wei-cheng, et al. Review of Deep-Sea Actuators and Marine Bionic Robots Based on Intelligent Materials[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(2): 301-313.
- [98] 尹建伟. 材料设计研究的3个视角[J]. *包装工程*, 2021, 42(10): 14-18.  
YIN Jian-wei. Three Perspectives of Material Design Research[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(10): 14-18.
- [99] 赵惠敏, 王春琴, 罗虹. 功能材料在兵器上的应用与进展[J]. *包装工程*, 1997, 18(1): 5-12.  
ZHAO Hui-min, WANG Chun-qin, LUO Hong. Application and Development of Function Material to Military[J]. *Packaging Engineering*, 1997, 18(1): 5-12, 28.
- [100] KOPMAN V, LAUT J, ACQUAVIVA F, et al. Dynamic Modeling of a Robotic Fish Propelled by a Compliant Tail[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(1): 209-221.
- [101] LIU Bo, ZHANG Shi-wu, QIN Feng-hua, et al. Fluid-Structure Interaction Study on the Performance of Flexible Articulated Caudal Fin[J]. *Advanced Robotics*, 2014, 28(24): 1665-1676.
- [102] 于凯. 形状记忆合金丝驱动的仿生鲫鱼设计与研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.  
YU Kai. Design and Research of Bionic Crucian Carp Driven by Shape Memory Alloy Wire[D]. Nanjing: Nanjing University of Aero-nautics and Astronautics, 2016.
- [103] 陈东良, 臧睿, 段鹏, 等. 基于新月鱼尾推进理论的多连杆鱼骨仿生设计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2019, 49(4): 1246-1257.  
CHEN Dong-liang, ZANG Rui, DUAN Peng, et al. Biomimetic Design of Multi-Link Fishbone Based on Crescent's Fishtail Propulsion Theory[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(4): 1246-1257.
- [104] ALVARADO V Y, ALVARO P. Design of Biomimetic Compliant Devices for Locomotion in Liquid Environments[J]. *Massachusetts Institute of Technology*, 2006, 128: 3.
- [105] 李岳明, 王小平, 张军军, 等. 基于改进二次规划算法的X舵智能水下机器人控制分配[J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(5): 524-531.  
LI Yue-ming, WANG Xiao-ping, ZHANG Jun-jun, et al. X-Rudder Autonomous Underwater Vehicle Control Allocation Based on Improved Quadratic Programming Algorithm[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(5): 524-531.
- [106] ZHILENKOV A, CHERNYI S, FIRSOV A. Autonomous Underwater Robot Fuzzy Motion Control System with Parametric Uncertainties[J]. *Designs*, 2021, 5(1): 24.
- [107] ALGARÍN-PINTO J A, GARZA-CASTAÑÓN L E, VARGAS-MARTÍNEZ A, et al. Dynamic Modeling and Control of a Parallel Mechanism Used in the Propulsion System of a Biomimetic Underwater Vehicle[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 4909.
- [108] 张鸿健, 韩捷, 蒋维涛, 等. 柔性水下悬停机器人的液气相变驱动及制造[J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(2): 10-17.  
ZHANG Hong-jian, HAN Jie, JIANG Wei-tao, et al. Liquid-Gas Phase Change Driving and Manufacturing of Flexible Underwater Hovering Robot[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(2): 10-17.
- [109] NOR M S A M, ALIFF M, SAMSIAH N. A Review of a Biomimicry Swimming Robot Using Smart Actuator[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2021, 12(11): 395-405.

责任编辑: 陈作