

1.1 研究背景

海洋约占地球总水量的 97%，蕴藏了极其丰富的海洋生物资源和海洋能源，是人类维持自身生存与发展的可拓展空间。纵观世界历史发展，任何大国的崛起必然伴随其海洋开发和利用进程，世界强国大多也是海洋强国。目前，随着陆地资源日趋枯竭以及世界政治格局的变化，人类对海洋的认识和利用正在发生着深刻变化，海洋生物、能源、空间等资源所潜藏的巨大利益得到了前所未有的关注，海洋经济的良性循环将有效促进和推动人类可持续发展。因此，认识、开发和利用海洋资源正逐步成为世界各国发展的普遍战略，提高海洋资源开发能力也成为世界各国科学技术的研究热点。

在推进海洋资源开发历程中，世界各国都在不断调整自己的海洋战略，加大建设海洋强国的步伐。例如，美国制定了《21 世纪海洋蓝图》、《美国海洋行动计划》、《海洋空间规划框架》等中长期发展战略规划；英国制定了《2025 海洋计划》和《英国海洋科学战略 2010—2025》等发展规划；加拿大实施 21 世纪海洋发展战略；俄罗斯提出了新时期全方位的海洋发展规划；日本提出 21 世纪实现海洋科技大国目标；韩国和印度也分别提出了建设海洋强国的措施，并制订一系列海洋工作计划。在我国，海洋科技发展进入新时期，政府制定了“关心海洋，认识海洋，经略海洋”的海洋强国战略，提出要切实提高知海、管海、护海、用海的能力，建设透明海洋、智慧海洋和生态海洋。

近年来，我国海洋开发利用、海洋安全、海洋管理等方面权益不断地受到外界挑衅和滋事，如钓鱼岛争端愈演愈烈、南海油气资源被周边国家疯狂盗采、部分蓝色国土正被邻国蚕食等。党的十八大报告指出，中国将坚决维护国家海洋权益，提升经略海洋能力，建设海洋强国。经略海洋，必须装备当先。海洋工程装备是开

发、利用和保护海洋,发展海洋经济的前提和基础。海洋工程装备制造业是《中国制造 2025》确定的重点领域之一,是我国战略性新兴产业的重要组成部分和高端装备制造业的重点方向,是国家实施海洋强国战略的重要基础和支撑。其中,水下机器人是海洋工程装备制造业的重要分支之一,可以广泛应用到海洋环境观测、海底地形探索、水下目标检修、海上事故应急等诸多领域。

目前,水下机器人一般作为水下运载和作业平台,实施水下目标操作。根据应用场景的不同,水下机器人通常对应多种不同的技术要求。例如,在环境监测和军事侦察等领域,要求水下机器人作业时间长、作业范围大,但本身承载能力或承载空间有限,不能加载太多能源的场合;在海底勘探、海洋救捞、搜索救援以及海洋复杂环境检测(如沉船内部)等领域,要求水下机器人机动性能高,体积小,能够在狭窄或复杂空间场所较好地完成任务;在海洋生物、珊瑚礁群观察领域,要求水下机器人推进噪声小、环境扰动小等。上述应用场景的不同,使得常规水下螺旋桨推进器很难满足要求,也使得水下机器人技术得到了科研工作者的广泛关注。

目前,国内外工程师研制了多种不同类型的水下机器人。根据操作控制方式的不同,可分为以下几种^[1-2]:

(1) 自主型水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV): 指具有智能行为的高级水下机器人,具备自动驾驶、导航定位、自诊断和故障处理、环境测量等功能,具有活动范围大、机动灵活、隐蔽性好的特点,而且结构简单、尺寸小、造价低,目前仅限于简单的水下探测作业。AUV的优点是由于没有电缆连接,其活动范围较大,不受母船制约;不足之处是对机器智能要求较高。

(2) 遥控型水下机器人(remote operated vehicle, ROV): 此种水下机器人由水面上人员进行遥控操作,水面上人员可实时观察到水下环境。这种机器人对机器智能要求不高,缺点是由于电缆连接,其活动范围有限。

(3) 自主-遥控混合型水下机器人(autonomous & remote-operated vehicle, ARV): 此种水下机器人采用自主和遥控两种控制方式,兼具自主型和遥控型水下机器人的优点。

尽管当前水下机器人技术使得人类的涉海活动空间不断取得突破,如近期中科院沈阳自动化研究所的“海斗”号 ARV 成功完成了万米以上无人深潜,但水下机器人推进性能依然远逊于海洋生物的游动运动,其根源很大程度在于推进机理的不同。目前,为了探测和开发海洋,人们研制了多种水面舰艇和水下潜器,大多采用螺旋桨作为动力装置。螺旋桨推进器将驱动单元的运动转换为旋转运动,因此可以很方便地与内燃机、电机等旋转驱动方式结合。但螺旋桨推进方式因为旋转运动造成了尾流中垂直于推进方向的速度分量,流场中的部分能量消耗并不能产生推力,而载体也必须克服与螺旋桨转动方向相反的较大转矩,因此螺旋桨推进效率是比较低的^[3]。另外,在高速旋转情况下,螺旋桨会产生气穴空化现象,降低了桨叶的使用寿命。螺旋桨推进系统具有结构复杂、推进效率低、体积大、重量

重、噪声大和环境干扰强、瞬时响应存在严重滞后等缺陷。

相比较而言,为了实现捕获食饵、逃避敌害和繁殖后代等生存需要,海洋中的鱼类经过亿万年的自然进化,获得了非凡的水中运动能力,既可以在持久巡游下保持低能耗和高效率,也可以在逃逸状态下爆发极高的游动加速度,还可以在复杂狭小环境中实现高机动性游动^[4-5]。在自然界中,不同类型的鱼体能够利用周围的流体来减小其游动阻力,实现长距离巡航、快速机动响应等,呈现出高效的游动性能^[6]。例如,水下机器人的平均推进效率为40%~60%,而鱼类的游动推进效率通常可达80%以上;普通船舶的回转半径至少为3~5倍体长,而鱼类的回转半径只有0.1~0.3倍体长,并且回转速度较快^[7];在捕食或逃避天敌时,海豚的加速度可以达到20~50倍的重力加速度,远超过人造水下航行器的加速性能^[8]。总体上,海洋游动生物推进所具备的优点恰好能够弥补目前水下机器人的推进效率低、机动性差等不足,为新型水下推进机理的研究提供了富有价值的借鉴。

在漫长的环境适应过程中,海洋游动生物在感知方式、执行方式、控制方式、信息处理和行为决策等方面具有绝对优势。目前,仿生学学者正逐步研究如何通过学习和模仿来复制和再现鱼类的特征和功能,从而用来改进和完善现有水下航行器的推进性能。海洋游动生物仿生学研究综合了生命科学、数学力学、信息科学、工程技术及系统科学等多学科内容,将海洋游动生物的精巧结构、运动原理和行为方式等所获得的知识应用到水下机器人设计中,为机器人学提供模仿和学习的样本,能够进一步促进仿生机器学(biomimetics)的发展,它也是目前机器人学活跃的研究领域之一。

随着仿生学、材料学、机械学和自动控制等技术的发展,海洋生物仿生学研究虽然已经取得了诸多进展,并在仿生水下航行器以及生物流体力学研究等方面形成特色,研究人员基于鳗鲡科、鲔科、鳐科、水母等不同生物原型设计了多种仿生水下航行器,但大部分水下机器人的推进性能还无法与海洋生物相媲美,其原因在于仿生学者并未完全揭示鱼类的游动机理,未能精准地把握及利用仿生原型的运动机理^[9]。仿生游动机理是设计仿生系统和提升推进性能的科学基础。

在自然界中,85%的鱼类利用身体和尾鳍的摆动,形成向后传播的鱼体波曲线,并在水中获得快速、高效和高机动性的游动性能。本书以身体/尾鳍推进模式(body and/or caudal fin,BCF)鱼类为研究对象,重点阐述身体/尾鳍推进模式的游动性能与复合鱼体波动状态、身体刚度阻尼、鱼体波动曲线参数以及流体环境等因素之间的复杂关系。根据前期研究可知,一方面鱼类游动性能可通过其复合波动曲线参数来评价,如鱼体波动曲线波数、摆动幅值以及摆动频率等^[7];另一方面,鱼类游动时所产生的复合波动曲线是由其身体的刚度、阻尼和流体环境共同决定的,而鱼体的刚度和阻尼可通过脊椎、肌肉和皮肤等生物组织来进行调节^[10-11]。总的来说,它们之间的复杂关系及其对应的游动机理并不明确。在仿生机理方面,鱼类复合波动推进模式、鱼体柔性动力学特性、鱼体与流体的耦合特性以及仿生机

器鱼的研制等研究仍然存在许多亟须解决的科学问题。

鉴于上述分析,本书结合研究背景和研究基础,以鱼体的复合波动曲线为研究对象,在考虑流体与鱼体相互作用的前提下,建立鱼类游动模型,研究鱼体复合波动的动力学特性。结合鱼体的振动模态特性,通过鱼体的摆动曲线来分析鱼类的推进模式。另外,采用计算流体力学方法,提出了适合模拟鱼类游动的数值方法,并建立鱼体的约束游动模型和自由游动模型,以分析鱼类在不同运动状态下的推进性能。最后,作为鱼类推进机理和机器人技术的结合点,重点阐述水下仿生机器人研究情况,为研制高效、高机动性、低噪声和易隐蔽的水下航行器提供了一种新思路。该研究结合了振动模态、黏弹性力学和计算流体力学等基础理论,对揭示鱼类快速高效的游动机理以及水下航行器的控制有着非常重要的意义,可为缩小仿生水下航行器与生物原型之间游动性能的差距提供理论依据。另外,该研究对于人们认识生物运动及进化规律、推进流动控制理论的发展具有重要的科学价值,同时,对于新型水下推进器和水下柔性储能系统等战略性、前沿性工程技术的发展也具有重要的参考价值。

1.2 鱼类仿生学的研究内容

水下仿生机器人研究是一个多学科交叉、融合的研究领域,涉及仿生学、流体力学、机械学、材料学、控制论和电子学等多个学科。在1936年,英国生物学家Jame Gray提出著名的海豚游动效率之谜——Gray悖论(Gray's paradox),即在速度相同的条件下,海豚游动消耗的能量约为拖动其刚体模型所需能量的七分之一^[12]。Gray悖论产生的主要原因在于忽略了海豚游动在流场中的减阻和能量吸收机制。在经历大约60年后,美国麻省理工学院(MIT)于1994年首次研制出水下仿生金枪鱼样机,该研究也正式拉开了鱼类仿生学的研究序幕。从20世纪90年代后期至今,世界各国研究者纷纷展开了鱼类游动机理的理论研究和仿生机器鱼的工程实验研究。

作为一个包含仿生技术和机器人技术的多学科问题,鱼类仿生学研究目前受到了生物学家和机器人学者的关注。国际机器人杂志 *Autonomous Robots* 推出了专刊“*Special Issue on Biomimetic Robotics*”,分别从仿生推进、仿生传感系统、仿生驱动技术、基于生物学的传感-电机控制技术、学习和导航、机器人行为的学习和控制等六方面介绍了仿生机器人技术。类似地, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 在2004年也推出了“*Biology-Inspired Science and Technology for Autonomous Underwater Vehicles*”水下仿生机器人专刊,从水动力学、基于神经科学的控制、仿生驱动技术和系统集成技术等四方面介绍了鱼类仿生学的研究内容。目前,仿生机器学发展迅速,水下仿生机器人研究已经取得了良好的进展,实现了水下仿生机器鱼在水中的三维游动、快速启动、快速转弯等,在推进速度和推进效

率等方面有了较大提高,但与真实鱼类的游动还存在非常明显的差距。鉴于此,结合笔者近十年的研究基础,本书从鱼类仿生机理出发,重点介绍鱼类仿生学目前的研究热点内容。

1. 鱼类的复合波动游动模式研究

鱼类复合波动推进模式研究,即建立有效的鱼体游动运动学模型,它是流体力学研究者建立水动力学模型、进行仿生机器鱼设计和研制等的重要依据。目前,鱼类复合波动游动模式的研究主要分为两类:①简化生物观测结果,提取有效信息;②利用流体力学理论推导波动推进形式。但是,由流体力学研究者提出的鱼类波状游动模型通常具有计算量大、参数过于烦琐等缺点,很难应用于实际仿生机器鱼的设计中。从现有的文献来看,完善精确、适用于仿生机器鱼设计的运动学模型依然是鱼类仿生学研究的主要内容之一。

目前,鱼类复合波动游动模式的研究仍然是鱼类仿生学研究的基础内容之一。根据鱼类游动推进的形态学和运动学特征,在明确研究目的和技术指标的前提下,选择具体的仿生对象,利用高速数字影像技术,结合生理学、解剖学和生物力学,研究生物原型的运动过程,在此基础上进行数学分析和抽象,建立精确描述鱼类复合波动推进的运动学模型,为后续仿生机器鱼的广泛应用提供模型基础。

另外,鱼类的复合波动游动模式研究通常忽略了运动模式的微小差异,而这些差异往往对应着游动机理的不同内涵。在现有文献中,缺少鱼类复合波动游动模式运动学参数的详细分析,特别是结合鱼类动力学特性分析以及流体力学特性分析。例如,鱼类的高机动运动通常认为是鱼体在流体环境中涡流主动控制的结果,是典型的非定常流动控制问题。这就需要深入研究鱼体复合波动变形运动和流体环境之间的相互作用机制,揭示高机动运动的非定常水动力学控制机制,这样有利于水下仿生技术的拓展应用,提升水下机器人的运动能力。

2. 柔性鱼类变刚度动力学特性研究

生物实验已表明鱼类可通过调节身体刚度以改变自身固有频率,以匹配尾鳍摆动频率,使其在游动过程中产生共振,从而提高游动速度和降低游动能耗^[13-14]。近年来,仿生学者受此启发,研制了多种可变刚度的仿生机器鱼,但变刚度性能无法达到真鱼变刚度的性能,缺乏鱼类在流体环境中的变刚度机理的深入研究。总体上来讲,柔性鱼类变刚度动力学特性研究存在以下问题:

(1) 缺少鱼类变刚度的设计准则,鱼体变刚度特性与游动性能之间的关系尚不明确;

(2) 在仿生机器鱼研究中,缺少合适的变刚度机构,以满足鱼体大范围、主动和实时变刚度特性。

深入探索柔性鱼类变刚度动力学特性,首先要明确鱼体内部生理构造,从生物力学的角度探索变刚度的变化规律;其次建立简单实用的动力学模型,利用理论建模、数值模拟以及实验测量三种方法研究变刚度特性;最后设计对应的仿生变

刚度机构,通过优化变刚度机构几何参数,使变刚度范围最大化,实时调节仿生机器鱼刚度以提高游动性能,进行鱼体变刚度控制策略研究。鱼类变刚度动力学特性研究,为揭示鱼类高性能游动的仿生学机理提供了研究思路,也为高性能变刚度仿生机器鱼的新型设计提供了理论依据。

3. 柔性鱼体感知信息与流体减阻机理探索

在游动过程中,鱼类通过摆动鱼鳍产生合理的流场来获得推力,这一过程伴随有非定常涡的产生。从流体力学的角度看,鱼类高性能游动的关键在于合理的涡控制。近期研究发现,鱼类可通过身体两侧的侧线(lateral line)器官感知周围流场的情况,并且动态地调整鱼体复合波动状态,达到高效减阻的目的^[15]。例如,遍布鱼类躯干和尾部的侧线器官能察觉低频的振动,从而判断水波的方向及大小,感知水流方向和压力的改变以及周围生物的活动情况等;南美弱电鱼(Gymnotiformes)能主动产生一个类似正弦性质的电场,用于传感、通信和导航等。

在自然界中,鱼体具有强大的感知信息的能力,如何将鱼体独特的信息感知和处理机制与流场信息相结合,以便分析鱼类的游动机理,该方面研究目前还停留在实验测量阶段。将实验测量和理论分析结合起来,可以探讨柔性鱼体感知信息与流体减阻机理,分析鱼类信息感知与流场信息之间的内在规律,为其运动控制和高性能仿生机理研究提供理论基础及方法指导。对于仿生机器鱼,需要模拟鱼类构建仿生传感系统,模拟水下生物体独特的感知器官,学习这些独特的水下感知原理,研制功能相仿的仿生传感器,以提高水下机器人在复杂环境下的应变能力。

以水下机器人平台为载体,需要将生物的自主运动转化为机器鱼的机械运动,分析鱼体的力学设计和控制机制,包括生物结构、材料属性、肌肉力学、神经控制等方面。随着传感技术和控制技术的发展,把视觉、超声和姿态等传感器集成到机器鱼本体上,采用多传感器信息融合方法来提高机器鱼与环境的交互能力,从而实现仿生机器鱼的自主控制,将大大提高仿生机器鱼对环境的适应性,拓宽机器鱼的应用范围。

4. 高性能机器鱼的运动控制研究

经过亿万年进化,鱼类已获得了精细的生物结构和灵巧的控制策略。从工程学的角度来说,鱼体的肌肉骨骼系统可以看作一个集驱动和控制于一体的非线性耦合系统,其中包含神经与机械的前馈与反馈机制。而肌肉通常也不只是作为原动机,还具有刹车、弹簧与支撑的功能,这由其所处的运动状态决定。在充分研究鱼体肌体结构和运动特性的基础上,尝试采用新型的材料(如人工肌肉等)和新型结构来实现鱼体的结构功能。仿生机器鱼(biomimetic robot fish)是参照鱼类游动的推进机理,利用机械、电子元器件或智能材料来实现水下推进的一种运动装置。从仿生的角度来说,机器鱼的推进运动是基于鱼类的游动技能及其解剖学结构,靠波动或摆动的鱼体以及控制自如的背鳍和独特形状的尾鳍来实现的。

高性能机器鱼的运动控制主要指仿生机器鱼高效、高速、高机动的三维空间运

动和姿态稳定。要使仿生机器鱼准确到达指定位置,就必须利用各种传感器对游动过程中的状态参数进行测量,在游动过程中躲避障碍物,并结合控制算法对机器鱼的运动进行实时控制。在运动过程中,由于仿生机器鱼的形态,随运动而动态地改变,引起的流体附加质量效应使得鱼体很难保持平衡。对于仿生机器鱼运动过程中的快速推进和稳定性的矛盾,应当遵循“稳定第一,控制第二,推进第三”的原则,合理、有效地控制是连接稳定性和快速性的桥梁。仿生机器鱼的游动控制大体可分为速度控制和方向控制。在运动学和动力学模型尚不完善的情况下,参照鱼类推进的理论模型,在水动力学研究和实验的基础上开展仿生机器鱼智能控制算法研究,可有效提升机器鱼的可控性和机动性。

5. 多机器鱼的协调协作技术研究

对于机器鱼个体无法独立完成的复杂或不确定任务,可采用多机器鱼协调来完成。目前国内外多机器鱼协调的研究也是仿生机器人研究的热点之一。多机器鱼协调系统不仅可以继承多机器人系统的诸多优点,而且可以逐渐揭示或验证鱼类复杂的群体行为,将在海洋探测、太空探险、国土防御等领域发挥重要作用。

鉴于环境的复杂性和特殊性以及机器鱼自身特殊的推进方式,很难用解析的方法建立一个精确的数学模型,因此,针对机器鱼群开发出高效、高灵活性、高鲁棒性的协调与协作方法,是一个重要的且具有挑战性的前沿研究方向。参照多智能体理论,建立多机器鱼分布式控制系统,在此基础上,开展多鱼协调游动的水动力学模型、多机器鱼协调运动、队形控制等一系列关键技术的研究,可为未来实用型机器鱼的群体协作提供必要的理论和技术支持。

水下仿生机器人要适应复杂多变的工作环境,必须具备强大的定位、导航控制能力。多个水下仿生机器人要真正体现群体智能,必须具有良好的群体协调控制能力。随着制造、传感、控制等技术的发展,探讨集机构、驱动、传感、控制、通信为一体的水下机电系统结构,研制原理样机,并结合控制仿生如利用智能算法实现机器人的自主控制及群体间的协调控制,将是仿生机器人控制仿生的研究主题。

1.3 复合波动推进鱼类概述

1.3.1 鱼类推进模式分析

鱼类在不同的流体环境中有着不同的推进模式,这与鱼体几何外形、流体雷诺数和游动状态等有着密切的关系。根据游动持续时间的长短(或者尾体摆动的周期性),鱼类游动可分为稳态游动(周期性游动)和瞬态游动(非周期性游动),具体介绍如下:

(1) 稳态游动(periodic or steady swimming): 指较长时间的周期性往复运动。目前,鱼类推进模式分类的研究主要基于鱼体的周期性稳态游动。

(2) 瞬态游动(transient or unsteady swimming): 指持续时间非常短的游动, 常见于鱼类躲避敌害和捕捉猎物时的快速起动及急加减速等。

根据鱼类游动中摆动部位的不同, 相关学者对其推进方式进行了归纳和分类。1926年, Breder^[16]将鱼类推进模式简单地划分为鳗鲡科模式和鲈科模式两大类。1983年, Alexander等^[17]发现鱼类的推进主要依赖于中间鳍和对鳍的摆动, 而后又发现鱼类仅依靠尾鳍的摆动就可以实现推进。1984年, Webb等^[18]将鱼类推进模式分为身体/尾鳍游动模式(BCF)和中间鳍/对鳍游动模式(MPF)两大类, 如图1-1所示, 该分类是根据鱼类游动中所使用的身体部位进行划分的。这种分类方法开创了人们研究鱼类游动模式的先河, 对鱼类游动的描述较为直观, 但分类也过于简单。



图 1-1 鱼类身体/尾鳍和中间鳍/对鳍推进模式

(1) 身体/尾鳍推进模式(body and/or caudal fin, BCF)。该模式主要利用身体的波动及尾鳍的摆动产生推进力, 特点是瞬时游动的加速性能好, 周期游动的续航能力强。BCF模式具有高效和高速推进的特点, 本书主要介绍BCF推进模式鱼类的仿生学内容。

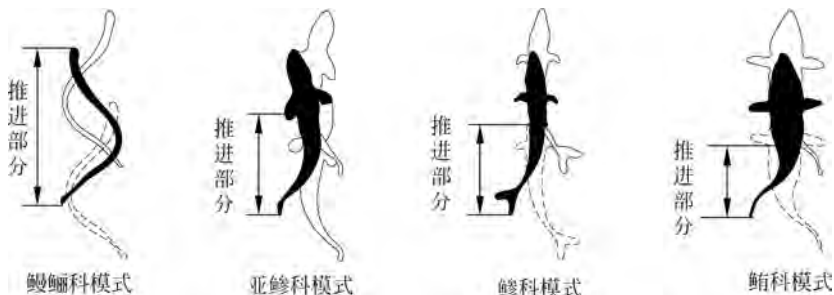
(2) 中间鳍/对鳍推进模式(median and/or paired fin, MPF)。该模式主要依靠胸鳍、腹鳍、背鳍及臀鳍等鳍面的柔性波动产生推进力, 特点是机动性好, 稳定性强。

根据参与摆动的尾体长度, 将摆动推进鱼类的身体/尾鳍推进模式进一步细化为鳗鲡科、亚鲈科、鲈科和鲈科模式^[19], 如图1-2所示。

(1) 鳗鲡科模式(anguilliform)。以七鳃鳗鱼等为例, 采用该模式的鱼类身体一般比较柔软, 整个身体从头至尾均参与波动, 而且身体至少呈现一个完整的波形。

(2) 亚鲈科模式(subcarangiform)。采用该模式的鱼类前部身体摆动幅度较小, 大幅值摆动常见于鱼体尾部。

(3) 鲈科模式(carangiform)。采用该模式的鱼类前部身体刚性较大, 后段逐渐减小形成尾柄。其波动主要集中在身体的后1/3, 且摆幅急剧增加。同时, 坚

图 1-2 摆动推进模式的传统分类^[19]

硬的尾鳍能够提供较大的推进力。以金枪鱼等为例,鲔科鱼类身体参与摆动的长度较小,具有游动速度快和推进效率高的特点,常被用于水下仿生机器人的设计^[20]。

(4) 鲔科模式(thunniform)。采用该模式的鱼类常具有高展弦比的尾鳍,身体刚性很大,侧向位移主要集中在尾柄和尾鳍部分。该模式的游动具有高速和高效特点,常见于长时间的巡游。

图 1-2 所示的分类方法定性地划分了摆动推进模式,简单直观,但该分类方法并未考虑鱼体运动参数(头部摆幅、摆动频率、鱼体的摆动曲线波长等)的变化情况^[21],即在不同的游动状态下,鱼类参与摆动的长度也会有所变化。

此外,文献^[22]中提到可将鱼类的推进模式分为波动推进和摆动推进,但没有给出具体的分类方法。具体内涵如下:

(1) 波动推进模式(undulation): 鱼类依靠其推进机构产生一列行波而前进,如鳗鲡科模式、亚鲭科模式、鲭科模式和鲔科模式等。

(2) 摆动推进模式(oscillation): 鱼类的推进机构绕着机构根部旋转产生推进力,而其他大部分鱼体并不参与,如箱鲀科模式等。

如图 1-3 所示,上述分类方式多针对鱼类的游动模式,而不是鱼类本身。同类鱼可能既能利用 BCF 模式实现高速推进,又能利用 MPF 模式实现机动转向和保持稳定。

目前,仿生研究者逐渐开始关注鱼类运动学参数与游动性能之间的关系,并将观测得到的生物学数据应用到鱼游的数值模拟中,从流体力学的角度揭示鱼类快速高效的游动机理。Videler 和 Hess 记录了鲭鱼(mackerel)和鳕鱼(cod)在稳态游动过程中鱼体的摆动曲线的变化情况,并得到了鱼体的摆动曲线满足傅里叶级数形式的结论^[23]。Tytell 和 Lauder 研究了美国鳗鱼(American eels)游动过程中的鱼体的摆动曲线,得到了幅值包络线的拟合方程和鱼体的摆动曲线波数^[21],该波数后被用在七鳃鳗仿生水下航行器的设计中^[24]。Videler 和 Wardle 总结了鱼类在稳态游动过程中波长的变化情况^[25]。上述研究表明,在不同游动状态下,鱼类参与摆动的尾体长度会有所变化,对应的游动性能也不相同。

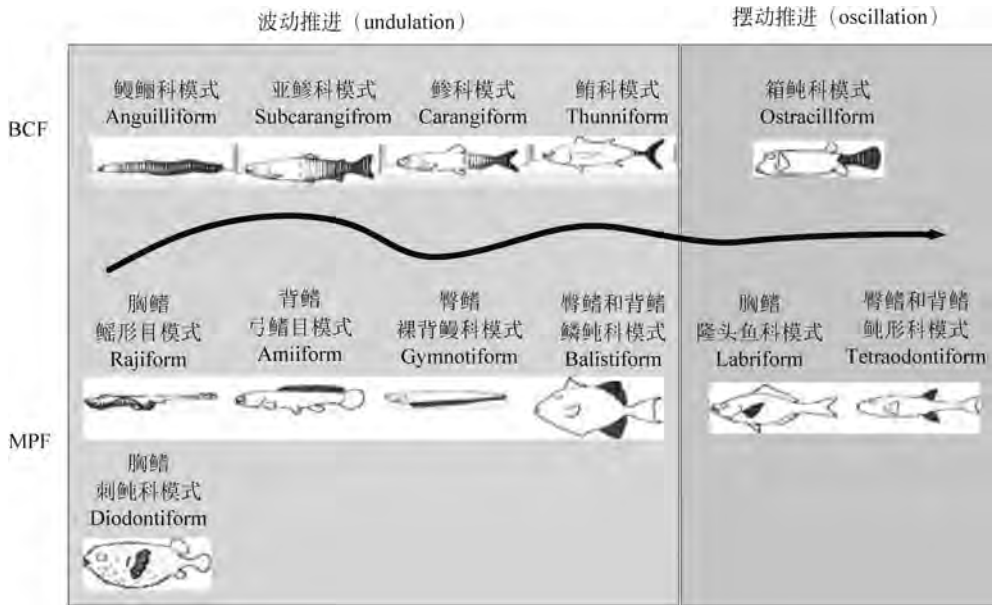


图 1-3 鱼类波动推进模式和摆动推进模式

1.3.2 鱼类游动性能评价

摆动推进鱼类游动性能的评价指标主要包括游动速度(游动步长)、推力、摆动幅值、斯特鲁哈数和游动效率等。这些游动性能指标既可用于鱼类游动性能的评价,也可用于仿生机器鱼推进性能的评价。各指标的具体含义如下:

1. 游动速度(游动步长)

在海洋中,大部分鱼类的游动速度一般为 $2\sim 12\text{ m/s}$,最大游动速度至少在 20 m/s 。例如,箭鱼的最大速度可达 $30\sim 35\text{ m/s}$ 之间,鲸豚类的最大瞬时游动速度在 $5\sim 25\text{ m/s}$ 之间。由于海洋中鱼类的长度不同(体长在 $0.2\sim 5\text{ m}$ 之间),仿生学研究中通常采用归一化相对速度 BL/s (body length per second, 体长/秒)来衡量鱼类游动速度的快慢。一般情况下,鱼类游动的速度可达 $3\sim 7\text{ BL/s}$,鲸豚类的游速可达 $0.7\sim 5\text{ BL/s}$,箭鱼的游速高达 11 BL/s 。在海洋军事应用中,鱼雷的速度可达 $2\sim 3\text{ BL/s}$,潜艇的速度小于 1 BL/s 。毫无疑问,鱼类等海洋生物的游动速度远超过现有的人造水下航行器。

对于仿生机器鱼,其游速可通过自主游动测量。通过测量机器鱼在一段距离内的游动,记录并分析机器鱼游动的轨迹从而得出运动规律。首先在机器鱼鱼体不同的关键部位设定标定点,然后采用数码摄像机对鱼类游动时标定点的运动进行动态采集,进而利用图像处理软件分析鱼类的游速。例如,Anderson 研制的无人水下航行器(VCUUV),它仿照鲔科模式的金枪鱼,最大速度为 1.2 m/s (0.5 BL/s)^[26];