

文章编号: 1007-7294(2025)07-1167-14

# 水下壁面效应研究进展及仿生学应用综述

谢 鸥, 李雨凡, 周大卫, 张陈波, 沈 灿  
(苏州科技大学 机械工程学院, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 水下壁面对水生动物生存活动和水下航行器的任务执行具有重要的影响。合理利用水下壁面效应可实现节能降耗, 相反地, 控制不当将引起安全事故。本文主要对水下壁面效应在各研究方向的成果进行综述, 包括水生动物近地面游动的活体观测研究、仿生简化模型的壁面效应研究和水下航行器的壁面效应研究。同时还介绍了水下壁面效应在仿生工程中的应用研究进展, 并提出了水下壁面效应研究所面临的主要问题和挑战。

**关键词:** 水下壁面效应; 水生动物; 水下航行器; 仿生学

**中图分类号:** TV131.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.07.015

## Research progress and biomimetic applications of underwater wall effects: A review

XIE Ou, LI Yu-fan, ZHOU Da-wei, ZHANG Chen-bo, SHEN Can

(School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** The underwater wall effect has a significant impact on the survival activities of aquatic animals and the task execution of underwater vehicles. Reasonable utilization of underwater wall effects can achieve energy conservation and consumption reduction, while improper control can lead to safety accidents. This paper mainly reviews the achievements of underwater wall effects in various research directions, including research on live observations of aquatic animals swimming near the ground, wall effects on simplified biomimetic models and wall effects on underwater vehicles. It also presents the research progress on the application of underwater wall effects in biomimetic engineering. At the end, the main problems and challenges faced by the research of underwater wall effects are proposed.

**Key words:** underwater wall-effect; aquatic animals; underwater vehicles; bionics

## 0 引 言

物体在靠近壁面附近运动时会受到流体动力干扰, 这种干扰力对物体的运动控制及安全影响很大, 称之为“壁面效应”。壁面效应是一种被广泛研究的现象, 在生物学、空气动力学和水动力学中都普遍存在。人类最早发现鸟类、昆虫等张开翅膀在近地面滑翔可实现稳定高度的长距离低功耗飞行, 并认识到地面对接近其滑翔的动物存在流体动力影响<sup>[1-3]</sup>。随着仿生工程的兴起, 壁面效应在实际工程中的应用越来越受到关注。按照壁面方位不同可将壁面效应分为底壁面效应(地面效应)和侧壁面效

收稿日期: 2025-01-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875380; 51975394)

作者简介: 谢 鸥(1983-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 通讯作者; E-mail: hnxieou@126.com;

李雨凡(1998-), 女, 硕士。

应<sup>[4]</sup>。在复杂狭窄的受限空间中,两种壁面效应往往耦合起来影响物体的运动。此外,按照物体运动模式的不同,可将壁面效应分为静态壁面效应和动态壁面效应<sup>[5]</sup>。人类对壁面效应的关注始于对动物在近地面滑翔的静态壁面效应研究,发现近地面滑翔对流场扰动小且只对阻力和升力影响显著,相关研究成果最早被应用在固定翼飞行器的起落过程控制中<sup>[6-7]</sup>,并逐渐扩展到高速列车、水面船舶等领域<sup>[8-9]</sup>。随着扑翼、旋翼、波动鳍等仿生驱动方式的出现,新型的仿生航行器在机动性和操纵性方面得到了大幅度提升,常被应用于各种非结构受限空间中执行复杂的作业任务,由此带来的动态壁面效应也逐渐成为研究的热点<sup>[10-11]</sup>。

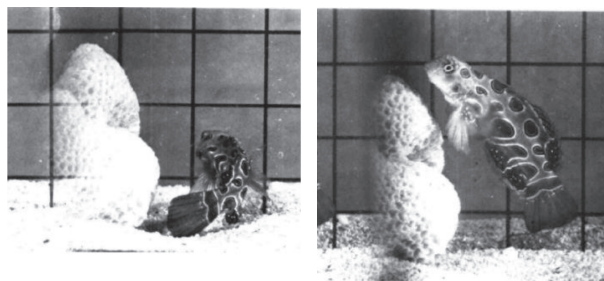
人类对空气动力学领域的壁面效应研究已经相对成熟并形成了一套较完备的体系架构<sup>[10]</sup>,而对水动力学领域的壁面效应研究起步较晚,但由于其生物学重要性以及在实际工程中的潜在应用,特别是作为降低水下航行器能耗和保证安全作业控制的基础,近年来开始受到人们的重视。无论是在静态壁面效应还是动态壁面效应方面,目前都面临许多充满挑战性的问题,有待进一步研究。本文对水下壁面效应研究的相关文献进行综述,重点介绍壁面效应在仿生水下机器人的水动力学研究中的最新进展,并指出未来可能的发展方向,以期对水下壁面效应研究以及仿生水下机器人的设计与控制有所帮助与启发。

本文首先介绍鱼类等水生动物在近壁面游动时的水动力学和流场分布特性,随后依次讨论了薄板结构、翼型结构、仿生水下机器人以及传统水下潜航器的壁面效应研究进展。接着,本文对水下壁面效应在仿生学应用中的新进展与新问题进行了介绍,并在最后对水下壁面效应的相关工作进行总结与展望。

## 1 水生动物近地面游动的活体观测研究

水生动物长期生活在复杂的水下环境中,进化出了许多独特的体型结构和优越的游动能力。为了捕食猎物或逃避敌害,大量的水生动物习惯于活动在海底或河床附近,称之为底栖动物。有的底栖动物悬浮在底面之上,也有部分底栖动物通过肢体直接与底面接触<sup>[12-13]</sup>。对活体鱼类的实测数据是模拟和分析工作的基础,因此前人对水生动物在近地面游动进行了大量的活体观测实验。赤魮、鳊鱼等底栖鱼类常在底面附近游动捕食,观测发现它们会通过调整游泳行为从而适应水底环境并从中获益,其中可能包括减少诱导阻力和增加升力<sup>[14]</sup>。盲鱼被引入到一个新的环境中时会表现出跟随壁面的行为,它通过侧线和触觉系统感知获取流场信息,从而调节身体与壁面的距离<sup>[15]</sup>。进一步,采用粒子图像测速(PIV)方法对墨西哥盲鱼在近壁面游动时的流场分布和侧线感知行为进行研究,发现鱼体在距离壁面 $0.2BL$ (Body length,  $BL$ )时,鱼体周围的边界层与壁面接触,导致边界层流体产生变化且变化幅度随距离减小而增大。当鱼体距离壁面 $0.1BL$ 时,壁面效应对侧线器官的刺激可让鱼体感知到壁面的存在,而距离大于 $0.25BL$ 时,鱼体无法探测到壁面<sup>[16-17]</sup>。

非结构化的环境壁面对水生动物的游动性能存在影响,水生动物如何通过调整自身的运动适应或利用壁面效应引起了研究者的关注。鳊鱼常常悬停在底面上方进行捕食,如图1(a)–(b)所示,观测发现,鳊鱼胸鳍的运动学变化、鳍下的水流速度、最小诱导推力和悬停所需的功率等,均与鳊鱼在底面上



(a) 底壁悬停<sup>[19]</sup>

(b) 侧壁悬停<sup>[19]</sup>

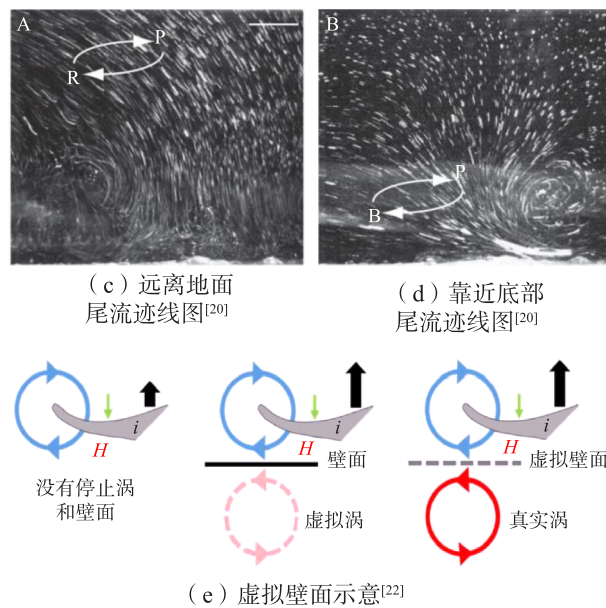


图 1 水生动物的壁面效应观测图像

Fig.1 Observation images of aquatic animals subjected to wall effects

方悬停的高度有关。当鳃鱼在底面上方常见观察高度悬停时,所需的总功率相比于无壁面效应减少了30%~60%,即壁面效应有利于降低悬停功耗<sup>[18]</sup>。八角鱼是一种底栖、重甲鱼类,主要使用胸鳍进行游动,Nowroozi等<sup>[19]</sup>采用高速运动学、升力测量和流场可视化等方法,研究了八角鱼产生推进力的同时克服显著负浮力的机理,通过对5条自由游动的八角鱼进行运动学观测发现,八角鱼倾向于在距离底面1 cm的范围内游动且身体保持稳定的小俯仰角,当八角鱼在距离底面1 cm以上的范围内游动时,俯仰角增大且与速度成反比,表明升力有助于克服负浮力;进一步,通过流场可视化实验观察到如图1(c)–(d)所示的流场结构,对比开阔水域可以发现,八角鱼在近地面游动时胸鳍产生的尾流与地面发生了强烈的交互作用,壁面效应增加了升力,从而抵消了负浮力。鱼类通过改变自身运动模式适应近壁面流场进而提升游动性能<sup>[20]</sup>。值得关注的是,在开阔水域游动的水生动物同样可以利用壁面效应来提升游动性能。Gemell等<sup>[21]</sup>采用高速视频跟踪、dPIV和压力场提取算法对水母的游泳性能进行量化,发现水母具有优越的推进性能是因为在开阔水域中,其通过在靠近身体的两个旋向相反的涡之间形成了“虚拟壁面”(见图1(e)),从而获得壁面效应,提高推进力。

此外,为了研究壁面结构对鱼类运动学和游动性能的影响,Webb<sup>[22]</sup>对在实心 and 网孔壁面通道中游动的虹鳉进行了测试记录,发现尾鳍摆动频率和摆动幅值的乘积与推进速度以及靠壁距离存在关系。实心壁面会降低鱼体游动效率但伴随着游动速度的提升,而网孔壁面对虹鳉的游动性能影响较小;实心壁面通道的宽度对摆尾频率影响小但会影响摆尾幅度,网孔壁面同样会减小摆尾幅度,但提升了摆尾频率。壁面的存在会降低虹鳉的游动速度。

## 2 仿生简化模型的壁面效应研究

### 2.1 柔性薄板结构的壁面效应研究

自从20世纪60年代以来,计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)逐渐兴起并成为流体力学研究的重要手段。将CFD方法引入到壁面效应研究可实现近地面流场的可视化分析,从而揭示壁面对水动力的影响机理。为了方便仿真计算,通常将水生动物或其肢体简化为柔性薄板结构。在流体载荷的耦合作用下,柔性薄板自主推进并产生被动变形从而模拟水生动物的柔性推进运

动。程健宇等<sup>[23]</sup>最早采用数值计算的方法分析了波动板在壁面附近运动受到的壁面效应,结果发现壁面效应能够使波动板产生的推进力明显增加,而对推进效率的影响则很小,底栖鱼类的扁平体型有利于通过壁面效应来提高推进力。Sierra等<sup>[24]</sup>建立了一个动态壁面效应理论模型,研究了壁面对二维波动板游动性能的影响,结果表明波动板在距离壁面一定范围内,动态壁面效应能够改善波动板的推进性能,提高推进效率,并指出壁面对波动板游动性能的影响与波动板的运动学有关。Park等<sup>[25]</sup>采用二维柔性板模拟鱼鳍的拍动运动,如图2(a)所示,在柔性板的前端施加垂直于地面的往复运动,板面与流体耦合作用产生被动变形,从而使柔性板在静态水域中自由推进,计算结果显示柔性板在近地面的推进速度比在开阔水域中提高了14%,推进力增大了37%,弗劳德推进效率提高约17%;柔性板的运动学受地面影响而被动变化,其后缘的振幅受地面的影响而减小;壁面对柔性板推进力和输入功率的促进或抑制作用不仅是水动力变化的直接结果,也是柔性板自身运动学改变的间接结果;柔性板在尾迹中产生的对称涡街,受地面影响而出现混乱,从而影响了柔性板的水动力学特性(见图2(b))。Ryu等<sup>[26]</sup>采用浸入边界法仿真分析了柔性波动板在近地面游动的水动力学优势,同样指出柔性板在地面附近波动能获得更多的推进力和更大的推进速度。Dai等<sup>[27]</sup>研究了小摆幅柔性拍动板在壁面附近的自主游动,重点关注了柔性板的弯曲刚度和靠壁距离两个因素对柔性板推进性能的影响。结果发现壁面能够提升刚性板的巡游速度但是降低了其推进效率,而对柔性板的推进速度和效率都有提升作用,且柔性板在近地面游动时产生的横向力更小。同理,由于壁面的存在,柔性板刚度的变化打破了涡街的对称性,如图2(c)-(d)所示,在尾流中观察到旋涡配对、偶极上升和自旋等现象,从而导致柔性板的变形,输入功率和水动力也表现出非对称特征。此外,对于柔性波动板在近地面波动时如何保持与地面的稳定距离,研究人员从鳐鱼的近地面的游动得到了启发。通过采用二维波动板仿真模拟鳐鱼的近地面游动过程,发现鳐鱼贴底游动时,推进力和游动速度都得到了提升,而为了保持与壁面的距离不变,波动板需要适当增大板体的仰角<sup>[28]</sup>。

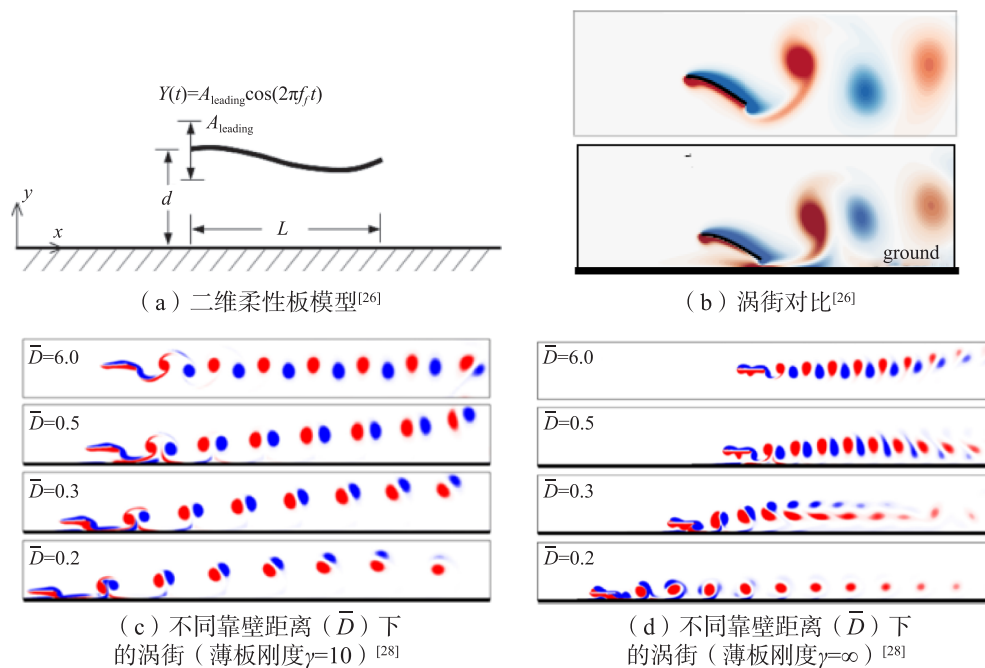


图2 二维柔性板的地面效应仿真

Fig.2 Simulation of ground effects on two-dimensional flexible plate

进一步, Tang等<sup>[29]</sup>采用浸没边界格子 Boltzmann 方法和有限元方法,研究了近地面三维柔性拍动板的自推进问题。如图3(a)所示,在三维柔性板的前缘施加垂直于地面的往复运动,在流固耦合作用下,三维柔性板沿水平方向自由移动。基于柔性拍动板的推进行为,可以定性地区别出壁面效应作用的

三个不同区域,分别称为受损、获益和无影响区域。在获益区域,推进效率增加而输入功率和弯曲变形较小;在受损区,推进速度增大,但输入功率也增加;在无影响区,壁面对柔性拍动板的游动性能无影响。拍动板的刚度会影响壁面效应的作用效果,通过给拍动板设置合适的刚度可提高其在近地面的推进性能。由于地面的存在,柔性拍动板在尾流中产生的上下两层涡呈非对称分布,如图 3(b)所示。

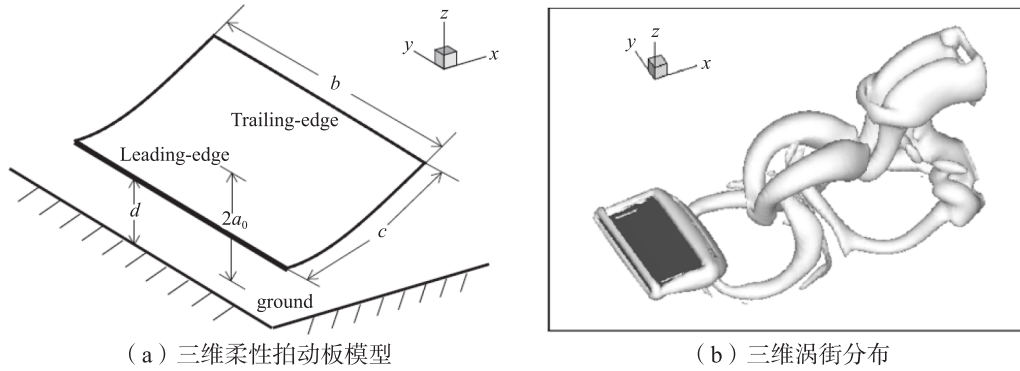
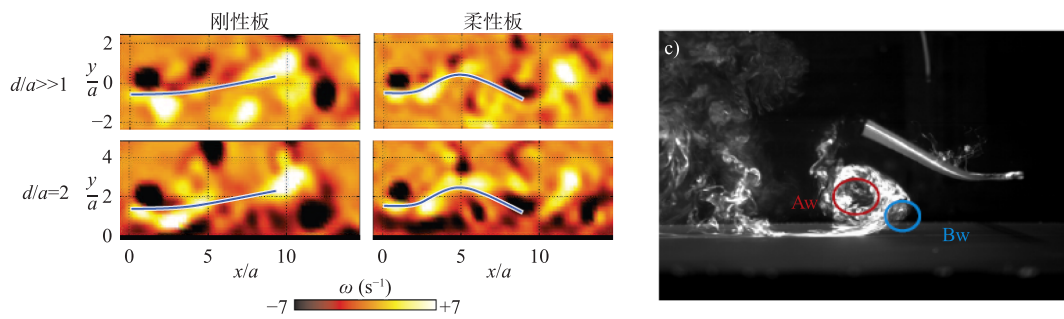


图 3 三维柔性板的地面效应仿真<sup>[29]</sup>

Fig.3 Simulation of ground effects on three-dimensional flexible plate<sup>[29]</sup>

为了验证柔性板在壁面效应作用下的水动力性能,研究人员对柔性板的地面效应特性进行了实验测试。将柔性板置于水槽壁面附近,在前缘施加驱动力使其做柔性拍动运动。采用水动力测量和 PIV 方法对柔性板的运动和流场结构进行测试,结果表明对于给定的运动模式,柔性板在近地面拍动时(尤其在共振状态下)可产生更多的推进力且有助于提高推进效率。对比两种不同刚度的柔性板在近地面拍动( $d/a=2$ ,  $d$  为柔性板距离地面的高度,  $a$  为柔性板的摆幅)的流场结构可以发现(如图 4(a)所示),柔性板前缘和后缘分离产生的涡,集中分布在沿柔性板和地面的边界层中,而在远离壁面时( $d/a \gg 1$ ),涡街均匀分布,板的刚度越小,产生的涡量强度也越小<sup>[30]</sup>。进一步, Fernandez-prats 等<sup>[31]</sup>通过实验测试了近地面自推进柔性拍动板的游动速度和推进力,并通过图像采集和 PIV 方法获取了柔性拍动板的运动学和尾涡结构。结果表明,由于壁面的存在,柔性拍动板的巡航速度提高了 25%,推进力提升了 45%。如图 4(b)所示,拍动板在壁面附近运动时,一个摆动周期内,在柔性板尾部产生了一对反向旋转的涡( $A_w$  为逆时针涡,  $B_w$  为顺时针涡)。此结论与仿真研究结果一致,验证了仿真结果的有效性。



(a) 不同刚度拍动板的尾涡分布对比<sup>[31]</sup>

(b) 柔性拍动板的尾涡结构<sup>[32]</sup>

图 4 柔性拍动板的地面效应实验

Fig.4 Experiment of ground effect on flexible flapping plate

### 2.2 仿生翼型的壁面效应研究

将水生动物简化为柔性薄板进行壁面效应研究忽略了被仿对象的外形特征,事实上,鱼类具有的各种体形特征是其为适应水下环境长期进化的结果。为了揭示鱼类游动时外形结构的减阻机理,采用翼型结构模拟鱼类的外形是常用的水动力仿真建模和实验测试方法。Xie 等<sup>[32]</sup>将鳐科鱼类简化为二维

翼型结构,采用浸入边界-格子玻尔兹曼方法仿真分析了其靠近单侧壁面游动的水动力学特性。结果表明,壁面对水动力参数的影响随斯特劳哈尔数和体波波数呈增大趋势变化,而与能量的提取效率呈减小趋势变化。如图5(a)–(b)所示,由于壁面的存在,尾迹中同样出现了成对且远离壁面的低压中心和旋转方向相反的涡对。进一步,Xie等<sup>[33]</sup>数值模拟了仿鲹科翼型在狭窄通道中(双侧靠壁)的游动过程,发现双侧壁面的存在有利于提升推进力,但会导致游动效率下降,翼型的波动运动引起周围流体与两侧壁面产生了强烈的交互作用,导致流场紊乱,相应的压力场分布和涡街分布如图5(c)–(d)所示。李永成等<sup>[34,4]</sup>采用重叠网格技术对考虑壁面效应的摆动翼的推进性能进行了数值模拟,发现摆动翼的推进力随靠壁距离的减小呈增大趋势变化,且存在最佳靠壁距离对应的最大推进效率。刘恒等<sup>[35]</sup>采用CFD方法对二维水翼的水动力性能进行了仿真,结果表明升力系数随阻塞系数的增大呈指数形式减小并趋于定值,阻力系数随着阻塞系数的增大,先减小、后增大最终趋于定值;当阻塞系数大于等于16时,升力系数和阻力系数不受壁面效应影响。初文华等<sup>[36]</sup>以鲫鱼自主游动达到动态稳定的巡游速度作为鲫鱼游泳能力的衡量标准,通过改变鱼体与侧壁之间的距离,探究壁面效应对鲫鱼游动的影响规律。发现鱼体与壁面距离较近时会限制鱼体运动并减小推进力,无论鱼体靠近单侧壁面还是双侧壁面游动,壁面效应都会导致鲫鱼巡航速度的降低,引起鱼体速度出现“失稳”,在鲫鱼距壁面 $0.2\beta L$ 时影响尤为明显。

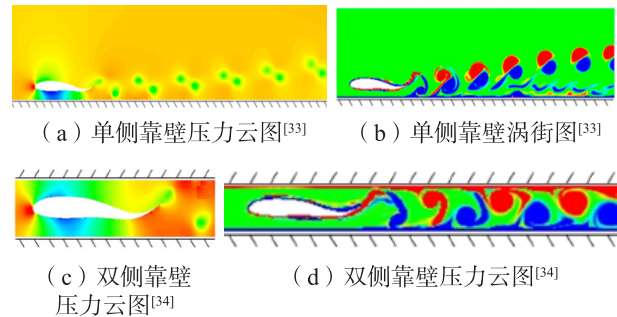


图5 二维翼型的壁面效应仿真

Fig.5 Simulation of wall effects on two-dimensional foils

同样,研究人员采用翼型模型也开展了壁面效应的水动力学实验研究。Quinn等<sup>[37]</sup>对在壁面附近作俯仰运动的翼型进行了试验测试,相应的测试平台如图6(a)所示。结果发现,壁面效应提升了翼型的平均推进力,但推进效率保持稳定。在不同的离地高度,升力呈现出两种状态:当 $0.4L < d < 1L$ 时( $d$ 表示翼型的离地高度, $L$ 表示翼型弦长),升力将翼型拉向地面;当 $0.25L < d < 0.4L$ 时,升力将翼型推离地面。在两种状态之间存一个稳定的平衡点,在此处平均升力为0而推进力可提高近40%。进一步,Mivehchi等<sup>[38]</sup>建立如图6(b)所示的实验平台开展了一系列实验,研究了扑翼运动在固体边界附近经历的壁面效应,结果表明靠壁距离对翼型的推进力和升力影响显著,翼型前端沿翼展方向的流场对确定翼型是受到壁面的排斥还是吸引具有重要影响。Kurt等<sup>[39]</sup>实验研究了翼型在地面附近绕前缘拍动的水动力学特性,分别考察了两种情况:翼型限制在空间某固定位置进行拍动和翼型沿推进方向自由游动。结果同样发现,在两种情况下翼型都存在平衡高度,当斯特劳哈尔数增加或减少拍动频率时,平衡点会距离地面更远。在平衡状态下,拍动翼型会产生偏转的尾流,同时能获得4%–17%的推力增额而推进效率保持

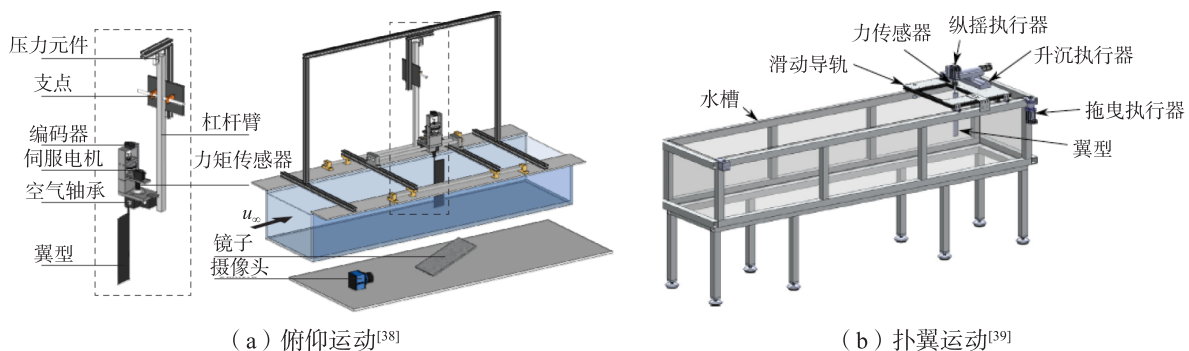


图6 翼型的壁面效应实验平台

Fig.6 Experimental platform for wall effects on wings

不变。此外，研究人员还开展实验研究了非平直壁面的壁面效应。在拖曳水槽中测试机翼在正弦曲面地形上方运动的升/阻力特性和翼尖涡结构，结果发现相比于平直地面，曲面地形对机翼受到的升/阻力产生了额外的周期性扰动，在较大攻角下，周期性曲面引起的地面效应具有更高的增升减阻效率<sup>[40]</sup>。

### 3 水下航行器的壁面效应研究

#### 3.1 仿生水下机器人的壁面效应研究

受水生动物优越的游动性能启发，研究人员对水生动物的外形结构和游动机理进行了研究，以期研发出高性能的仿生水下机器人。仿生水下机器人可替代人类在非结构环境中从事复杂的作业任务，受限空间的壁面对仿生水下机器人运动性能的影响成为水下壁面效应研究的一个重要方向。壁面效应随运动学而变化，底栖鱼类通过调节自身的游动行为减小地面对其运动产生的负面影响并从中获得有益的水动力性能。Xie 等<sup>[41]</sup>建立了一种三维仿生新月形尾鳍模型(见图 7(a))，仿真计算了尾鳍的三种近壁面拍动模式：垂直拍动(模拟海豚摆尾模式)、水平拍动(模拟鳝科摆尾模式)和两侧靠壁拍动。结

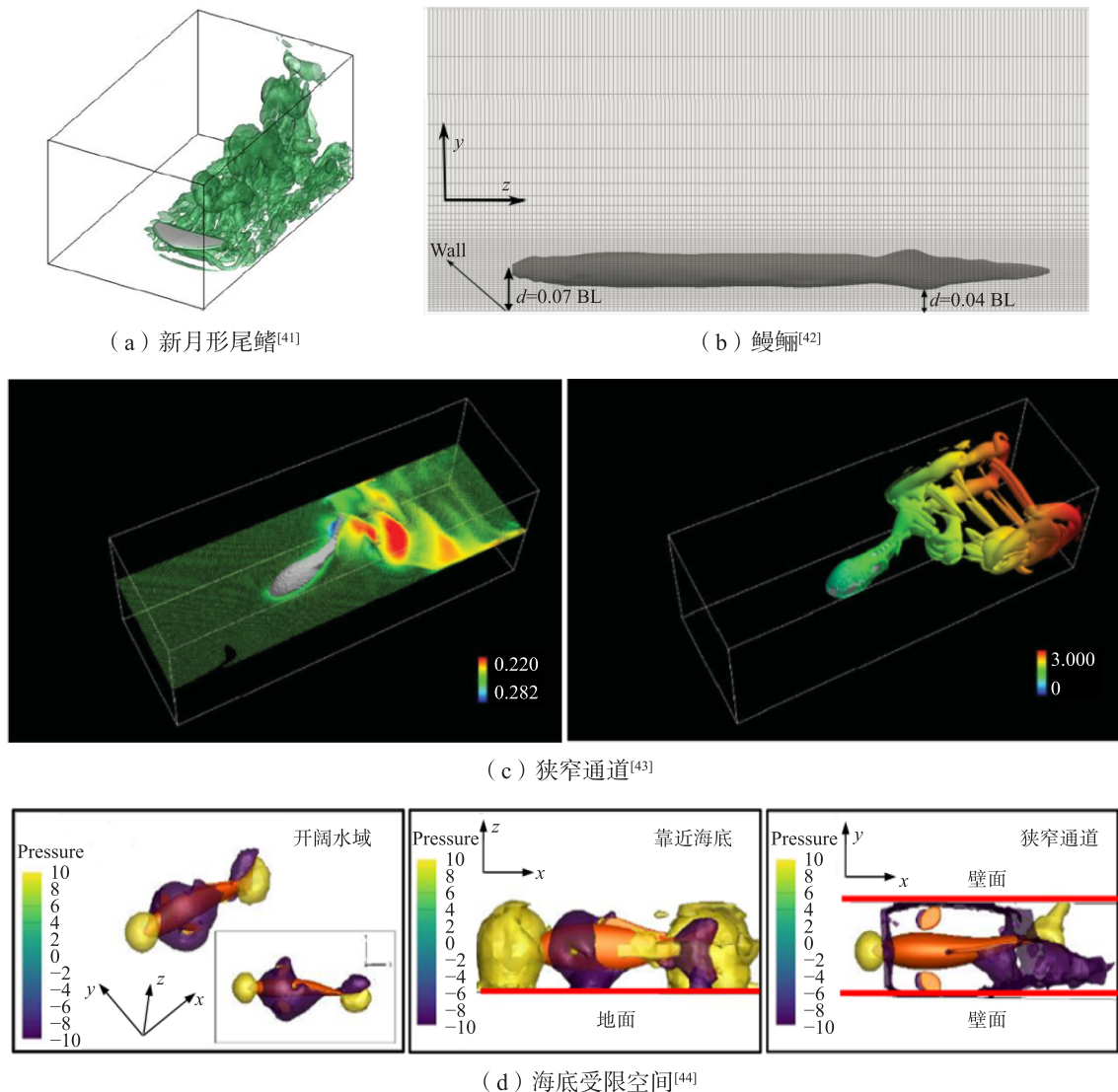


图 7 仿生水下机器人的壁面效应仿真

Fig.7 Simulation of wall effect on biomimetic underwater robots

果发现尾鳍靠近壁面拍动有助于提高推进力和推进效率。大面积尾鳍在垂直拍动模式下对水动力的影响更显著。此结论与前面章节的研究结果一致,认为近壁面游动可从壁面效应中获益。然而也有研究指出,壁面效应并不总能提升仿生水下机器人的游动性能,也会带来不利。Blevins等<sup>[14]</sup>受黄貂鱼启发建立了一个简单的柔性胸鳍模型,对比分析了固定运动学参数条件下,胸鳍在远离和靠近壁面游动时的自推进速度、能耗需求以及水动力学性能,结果发现,与滑翔鸟类以及其它固定翼飞行器不同,壁面效应不一定能提高波动鳍的游动性能,在大多数运动学条件下,波动鳍在壁面效应中的游动速度并不会提高而能耗却增长了10%。Ogunka等<sup>[42]</sup>数值模拟了鳗鲡在近地面(见图7(b))和远离壁面游动的两种模式,结果表明鳗鲡在距离地面0.04BL的静水中游动与在开阔水域中游动具有相同的速度、功耗、效率和尾涡结构,而在具有来流速度的流场中靠近地面游动时,鳗鲡的游动速度出现下降变化。为了揭示复杂地形约束下机器鱼的游动机理及周围流场演化规律,Zhang等<sup>[43]</sup>采用浸没边界法对自推进机器鱼在无滑移壁面通道内的游动过程进行了三维仿真,计算比较了机器鱼在不同靠壁距离下的游动速度,提取并分析了机器鱼在通道中游动的压力云图和涡街图(见图7(c)),结果发现通道壁面对机器鱼游动性能的影响很小。进一步,Xue等<sup>[44]</sup>建立了两种受限空间模型:阶梯形海床地形和狭窄通道地形,对仿鲹科机器鱼在受限空间中的游动过程进行了仿真。结果发现在阶梯形海床地形中机器鱼的推进力、弗劳德效率和游动稳定性受机器鱼距离海底高度的影响不大;当机器鱼在狭窄通道地形中游动时,机器鱼的推进力和游动稳定性随通道宽度减小而明显下降,受限空间的壁面对机器鱼周围的压力场演化产生了严重阻塞,从而影响了其游动的稳定性(见图7(d))。

研究人员同样开发了各种仿生水下机器人样机模型,并在不同的场景中进行了壁面效应实验研究。Blevins等<sup>[14]</sup>通过实验研究了平行壁面对波动鳍推进机器鱼游动性能的影响,结果验证了壁面效应并不是总能提高波动鳍的推进效率的结论,相反,地面限制了鱼鳍运动从而导致近壁面游动时效率下降。进一步研究发现,壁面对推进性能产生积极还是消极影响取决于鳍的运动学条件。谢鸥等<sup>[45]</sup>采用仿真和实验测试的方法,研究了机器鱼靠壁游动过程的壁面效应特性。结果表明壁面会对机器鱼靠壁游动过程的水动力产生影响,靠壁距离越小,产生的偏航力矩和侧向力越大,从而导致机器鱼形成远离壁面的偏航游动(见图8(a))。Ma等<sup>[46]</sup>搭建如图8(b)所示的壁面效应测试实验平台,测试了壁面效应对胸鳍驱动机器鱼游动性能的影响,结果发现胸鳍后缘的厚度和胸鳍距离地面的有效高度,是改变壁面效应影响的两个重要参数。减小机器鱼距离地面的高度,可提高机器鱼的推进力。随着胸鳍摆动频率和摆动幅度增大,平均推进力逐渐增大。

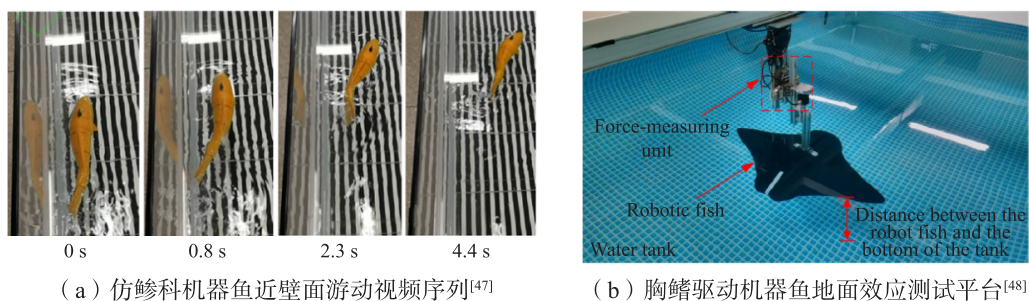


图8 仿生水下机器人的壁面效应实验

Fig.8 Wall effects experiment of biomimetic underwater robots

### 3.2 传统水下潜航器的壁面效应研究

传统水下潜航器在靠近壁面(如海底、障碍物等)航行时,同样会产生壁面效应,从而影响其运动性能和安全作业。传统水下潜航器一般由主体和翼、舵等附体组成,采用螺旋桨驱动,航行过程中主体不产生形变。在忽略附体的情况下,传统潜航器的外形可简化为楔形体、钝体等,研究人员采用不同的方法,对潜航器在有限水域的壁面效应进行了研究。冲击是常见的入水冲击问题,在有限流域的入水冲击必将受到壁面的影响。于鹏垚等<sup>[47]</sup>采用有限体积法和重叠网格技术研究了楔形体入水冲击过程中的

壁面效应,重点揭示了流域宽度、流域深度、冲击速度、底升角与壁面效应之间的关系,结果发现深度和宽度方向的壁面效应会增大楔形体的入水冲击载荷,冲击速度对壁面效应影响较小,底升角越小的楔形体,深度方向的壁面效应越明显。程丽等<sup>[48]</sup>针对三维 Rankine 卵形体和三维扁卵形体的钝体结构,分析了间距比、雷诺数、物体外形扁平度等因素对钝体近壁面干扰力的影响,结果表明间距较大时,无黏性方法可以较好地预报钝体受到的吸力;间距较小时,流体黏性对干扰现象的影响不可忽略。潘光等<sup>[49]</sup>对近壁面圆柱的运动进行了数值仿真,发现在间隙比较大时,圆柱受壁面影响较小,受力大小与无界流场中圆柱绕流的受力接近;在间隙比较小时,圆柱受壁面干扰作用较明显,并且在靠近壁面时其两侧的涡会往上移动。Yuan 等<sup>[50]</sup>开发了一个基于 3-D Rankine 源法的边界元程序,用于预测静水和波浪中侧壁对船模拖曳试验的影响,结果表明在静水中,水槽宽度、水的深度以及船模速度是影响壁面效应的三大因素,而在波浪中的侧壁效应更复杂,侧壁的反射波是壁面效应作用的主要原因。薛壮壮等<sup>[51]</sup>在静止黏性层流流体中,对平行于单壁面运动的刚性圆球所受壁面的升力和阻力进行了数值研究,发现壁面会造成阻力的增大。在近壁面处,雷诺数小于 100 时,升力系数随着雷诺数和圆球与壁面距离的增大而减小,当雷诺数大于 100 时,升力系数会显著增大,在远壁面处,只有雷诺数小于 10 时才会有壁面效应。

同理,研究人员针对水下潜航器的壁面效应也开展了水动力实验研究。Kumar 等<sup>[52]</sup>采用模型试验法研究了水池池壁对船舶模型阻力性能的影响,发现当水池宽度与模型宽度比小于 5 时,池壁影响不可忽略。进一步,Huang 等<sup>[53]</sup>通过模型试验研究发现,要想忽略壁面对自主水下航行器模型阻力及横向力的影响,水槽宽度与模型直径比不能小于 7。张亮等<sup>[54]</sup>在船模拖曳水池中进行了一系列流体动力干扰试验,测量船模受到的壁面干扰力,结果表明距离壁面较远时,船模与壁面之间相互吸引,距离壁面较近时,船模与壁面之间出现排斥作用力。考虑侧壁效应,刘晗等<sup>[55]</sup>采用 Tamura 速度修正公式对宽阔水域的试验流速进行修正,并将速度修正前后的水动力及流场特征与循环水槽斜航试验的计算结果进行对比,发现循环水槽中船体两侧的压力分布与其在宽阔水域中的差别较大。此外,曾岑等<sup>[56]</sup>在有限静止水域中实验测试了导管螺旋桨推进器与后壁面距离对于推进器推力模型的影响,结果发现推进器靠近后壁面时会造成严重的推力损失。

## 4 水下壁面效应的仿生学应用进展

壁面效应对水生动物的水动力性能产生积极或消极的作用与多种因素相关,但水生动物可通过调整身体形态和运动模式适应或利用壁面效应,从而提升游动性能。从仿生工程的角度出发,要实现对壁面效应的有益利用,要解决两个关键问题:壁面效应的感知和近壁面运动控制。由于水下环境光线不足,传统的光学感知方法无法满足水下探测需求,研究人员模仿鱼类侧线感知机理研究了基于人工侧线的近壁面的流场感知方法。DeVries 等<sup>[57]</sup>提出了一种由离子聚合物-金属复合材料和嵌入式压力传感器组成的多模态人工侧线,并利用反馈控制策略感知障碍物或壁面。Clark<sup>[58]</sup>建立了一种人工侧线系统,并提出了一种基于机器学习的壁面形状和尺寸分类模型,以及基于样条和无迹卡曼滤波的通用边界估计方法,结果表明该方法适用于壁面上存在单个和多个突起的位置测量。Yen 等<sup>[59-60]</sup>设计了一种装备有人工侧线的仿生机器鱼(见图 9(a)),并提出一种通过侧线感知体表流体压力变化从而控制机器鱼沿着透明玻璃壁面游动的方法,机器鱼通过分布在头部和身体上的压力传感器采集周围的流场信息并反馈给控制器,然后计算并预测鱼体相对于壁面的距离和角度,最终控制机器鱼朝规定的路径游动。Yang 等<sup>[61]</sup>提出了一种基于最大水动力激励策略的人工侧线压差和流速传感器优化布局方法,模仿洞穴盲鱼,设计并制造了机器鱼样机和侧线系统(见图 9(b)),采用压差传感器和热膜式流速传感器分别模拟侧线管道神经丘和表面神经丘,结果表明优化布局的侧线系统可探测 0.1BL 以内的壁面。Zheng 等<sup>[62]</sup>设计了基于压力传感器阵列的人工侧线系统(见图 9(c)),实现了仿箱鲀机器鱼感知并预测与相邻机器鱼相对横向距离和相对角度等信息的能力。谢鸥等<sup>[63]</sup>提出一种基于人工侧线的近壁面流

场识别方法, 基于多层前馈神经网络建立了来流速度和靠壁距离预测回归模型, 实现了对靠壁距离的预测并进行了侧线传感器阵列的优化。此外, 针对机器海豚在近地面游动时受水深压力和地面效应的影响, 姚吉等<sup>[64]</sup>提出一种非对称腹背式推进的俯仰抑制方法, 采用 CFD 仿真和实验测试方法对机器海豚在近地面的游动过程进行研究, 结果表明近地面非对称腹背式推进模式具有增推效应并可有效抑制俯仰力矩, 提高游动稳定性。

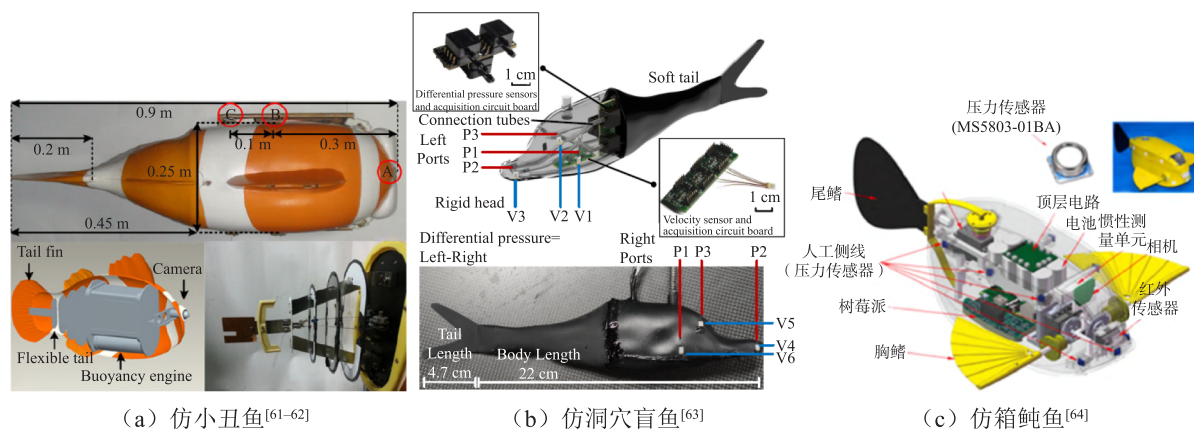
(a) 仿小丑鱼<sup>[61-62]</sup>(b) 仿洞穴盲鱼<sup>[63]</sup>(c) 仿箱鲀鱼<sup>[64]</sup>

图 9 人工侧线系统

Fig.9 Artificial lateral line system

壁面效应另一个延伸的应用场景是鱼类的集群游动节能。研究表明, 鱼类集群游动时的效率通常比单独游动时更高, 自然界中超过 50% 的鱼类表现出集群行为。关于鱼类集群游动节能的机理假设有两种: 涡流假说和槽道效应<sup>[65]</sup>。其中槽道效应指出, 鱼类的推进力因其近邻鱼和它们尾迹的靠近而增加, 鱼群中相邻鱼的靠近, 可以促进两鱼之间水的流动, 鱼类可以有效地利用旁边涡街诱导出的流动来提高游动效率。因此, 鱼类集群游动时, 可将相邻鱼引起的流场扰动等效为一种壁面效应。研究人员从流体动力学的角度在鱼群观测分析<sup>[66]</sup>、计算流体动力学仿真<sup>[67]</sup>和实验装置测试<sup>[68]</sup>等三个方面对鱼类集群节能进行了大量的研究, 以期在水下仿生机器人集群节能中取得突破。此外, 仿生机器鱼的集群控制方法是机器鱼实现集群节能的基础。目前关于集群控制的主要方式有编队控制和避障控制两种。Desai 等<sup>[69]</sup>首次提出领航者-跟随者的编队控制方法, 并利用反馈线性化的方法设计了编队控制率, 证明了其稳定性。Jia 等<sup>[70]</sup>结合一致性算法和势函数, 提出了一种领导者-跟随者结构的集群编队算法, 用于机器鱼系统执行群体任务, 并通过实验证明了算法的有效性。进一步, Jia Q 等<sup>[71]</sup>提出了一种基于势函数和行为规则的避障控制算法, 在控制律设计时, 将目标视为吸引物体, 障碍物视为排斥物体, 在障碍物环境的安全区、避障区和危险区分别设计控制律; 最终, 通过数值仿真表明 3 个水下机器人能够在短时间内自主避开障碍物, 并随编队在安全区域运动。

## 5 总结与展望

水下壁面效应的相关研究在近年来呈现不断增长的趋势, 特别是在仿生水下机器人领域已初步形成了系统的体系架构。本文围绕水下壁面效应从活体水生动物、仿生简化模型和水下航行器三个方面对国内外相关的研究进展进行了综述, 并介绍了水下壁面效应在仿生工程中的应用研究现状。由于水下环境的复杂性和不确定性, 仿生工程中的水下壁面效应还存在很多充满挑战性的问题有待解决与探索:

(1) 研究新型的水下壁面效应智能感知系统。利用或规避水下壁面效应的前提是能够对近壁面的流场态势进行感知与识别。基于流场压力和速度反馈的人工侧线系统具有天然的流场信息感知优势。然而, 近壁面的流场扰动具有复杂多变的特性, 给壁面效应感知带来了挑战。未来可从水生动物侧线感知器官的生理学研究入手, 深入探索水生动物的侧线感知机理, 研究新型的侧线感知传感器, 开发高精

度、高鲁棒性的水下壁面效应流场信息处理算法,从而获得可应用于复杂水下环境感知的探测系统。

(2) 构建壁面效应作用下的主动流场控制策略。主动流场控制能减少流体扰动带来的振动和阻力,具有可观的经济效益且能提升安全系数。由于壁面效应引起的流场扰动存在非线性和强耦合特征,无法建立系统控制模型,导致基于精确模型的传统控制方法不再适用。利用机器学习的方法深度强化学习,建立高维状态空间到动作空间的映射,是一种数据驱动的非模型控制方法,在非线性动力学控制问题以及欠驱动控制问题中具有较好的应用价值。将深度强化学习引入到近壁面流场的主动控制中,利用壁面效应感知系统采集的流场数据对模型进行训练,可实现高效稳定的近壁面主动流场控制。

(3) 探索鱼类集群游动高效节能的壁面效应机理。基于槽道效应的鱼群节能理论表明,壁面效应是鱼群节能的水动力学原因之一,但壁面效应在鱼群中对水动力的耦合影响作用机理尚不明确。如何优化壁面效应在鱼群中的分布形式,即鱼群的优化编队设计有待进一步研究。采用计算流体动力学仿真技术,结合拓扑学、多智能体控制以及强化学习等理论与方法,探索更加高效节能的集群构型,为仿生水下机器人集群编队提供理论基础。

### 参 考 文 献:

- [1] Baudinette R V, Schmidt-nielsen K. Energy cost of gliding flight in herring gulls[J]. *Nature*, 1974, 248(5443): 83–84.
- [2] Blake R W. Mechanics of gliding in birds with special reference to the influence of the ground effect[J]. *Journal of Biomechanics*, 1983, 16(8): 649–654.
- [3] Park H, Choi H. Aerodynamic characteristics of flying fish in gliding flight[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(19): 3269–3279.
- [4] 李永成, 张 璇, 潘子英. 考虑侧壁面效应的拍动翼推进特性数值模拟研究[J]. *船舶力学*, 2020, 24(5): 570–577.  
Li Y C, Zhang X, Pan Z Y. Side wall effect on the propulsive performance of flapping foils - A numerical investigation[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(5): 570–577. (in Chinese)
- [5] Rozhdstvensky K V. Wing-in-ground effect vehicles[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2006, 42(3): 211–283.
- [6] Katzoff S, Sweberg H H. Ground effect on down-wash angles and wake location[J]. *NACA Rept*, 738, 1943.
- [7] 张桂联. 对飞机着陆前近地平飞纵向运动的分析[J]. *航空学报*, 1965(1): 11–21.  
Zhang G L. Analysis of the longitudinal motion of aircraft in near ground flight before landing[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 1965(1): 11–21. (in Chinese)
- [8] 黄志祥, 金 华, 胡兴军, 等. 壁面效应对汽车模型气动阻力的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(4): 106–112.  
Huang Z X, Jin H, Hu X J, et al. Influence of ground effect on air drag of car model[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(4): 106–112. (in Chinese)
- [9] 赖晨光, 任淳麒, 阎志刚, 等. 气动悬浮列车单向翼翼型优化与地面效应分析[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(1): 123–128.  
Lai Chenguang, Ren Boqi, Yan Zhigang, et al. Optimization and wing-in-ground analysis on aero-train unidirectional-wing[J]. *ACTA Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(1): 123–128. (in Chinese)
- [10] Matus-vargas A, Rodriguez-gomez G, Martinez-carranza J. Ground effect on rotorcraft unmanned aerial vehicles: A review[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2021, 14(1): 99–118.
- [11] 董辰初, 胡丹丹, 王文帅, 等. 仿生扑翼飞行器的地面效应分析[J]. *自动化应用*, 2021(7): 8–14.  
Dong C C, Hu D D, Wang W S, et al. Ground effect analysis of biomimetic flapping wing aircraft[J]. *Automation Application*, 2021(7): 8–14. (in Chinese)
- [12] King H M, Shubin N H, Coates M I, et al. Behavioral evidence for the evolution of walking and bounding before terrestriality in sarcopterygian fishes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(52): 21146–21151.
- [13] Macesic L J, Kajiura S M. Comparative punting kinematics and pelvic fin musculature of benthic batoids[J]. *Journal of Morphology*, 2010, 271(10): 1219–1228.
- [14] Blevins E, Lauder G V. Swimming near the substrate: A simple robotic model of stingray locomotion[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2013, 8(1): 016005.
- [15] Patton P, Windsor S, Coombs S. Active wall following by Mexican blind cavefish (*Astyanax mexicanus*)[J]. *Journal of*

- Comparative Physiology A, 2010, 196: 853–867.
- [16] Windsor S P, Norris S E, Cameron S M, et al. The flow fields involved in hydrodynamic imaging by blind Mexican cave fish (*Astyanax fasciatus*). Part I: Open water and heading towards a wall[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(22): 3819–3831.
- [17] Hassan E S. Mathematical description of the stimuli to the lateral line system of fish derived from a three-dimensional flow field analysis—II The case of gliding alongside or above a plane surface[J]. *Biological Cybernetics*, 1992, 66(5): 453–461.
- [18] Blake R W. The energetics of hovering in the mandarin fish(*Synchropus picturatus*)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1979, 82(1): 25–33.
- [19] Nowroozi B N, Strother J A, Horton J M, et al. Whole-body lift and ground effect during pectoral fin locomotion in the northern spearnose poacher(*Agonopsis vulsa*)[J]. *Zoology*, 2009, 112(5): 393–402.
- [20] Webb P W. Kinematics of plaice, *Pleuronectes platessa*, and cod, *Gadus morhua*, swimming near the bottom[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2002, 205(14): 2125–2134.
- [21] Gemmill B J, Du Clos K T, Colin S P, et al. The most efficient metazoan swimmer creates a ‘virtual wall’ to enhance performance[J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2021, 288(1942): 20202494.
- [22] Webb P W. The effect of solid and porous channel walls on steady swimming of steelhead trout *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1993, 178(1): 97–108.
- [23] 程建宇, 庄礼贤, 童秉纲. 波动薄板游动的展向变形作用和壁面效应[J]. *中国科学技术大学学报*, 1991, 21(4): 423–427.  
Cheng J Y, Zhuang L X, Tong B G. The effects of spanwise deformation and closeness to the ground on the swimming of waving plates[J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 1991, 21(4): 423–427. (in Chinese)
- [24] Sierra D M, Guo J H. Two-dimensional dynamic ground effect on a swimming undulating plate: A parametric study[J]. *Journal of Mechanics*, 2018, 34(6): 863–877.
- [25] Park S G, Sung H J. Hydrodynamics of a self-propelled flexible fin in perturbed flows[J]. *Mechanical Engineering Reviews*, 2018, 5(1): 17–00286.
- [26] Ryu J, Park S G, Kim B, et al. Flapping dynamics of a flexible propulsor near ground[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2016, 32: 991–1000.
- [27] Dai L Z, He G W, Zhang X. Self-propelled swimming of a flexible plunging foil near a solid wall[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2016, 11(4): 046005.
- [28] 朱毅, 余永亮. 二维鳐鱼模型的近壁面增推效应[J]. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(1): 23–31.  
Zhu Y, Yu Y L. Thrust-enhancement of an undulating two-dimensional batoid-like model near a flat ground[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 34(1): 23–31. (in Chinese)
- [29] Tang C, Huang H B, Gao P, et al. Self-propulsion of a flapping flexible plate near the ground[J]. *Physical Review E*, 2016, 94(3): 033113.
- [30] Quinn D B, Lauder G V, Smits A J. Flexible propulsors in ground effect[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(3): 036008.
- [31] Fernández-Prats R, Raspa V, Thiria B, et al. Large-amplitude undulatory swimming near a wall[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(1): 016003.
- [32] Xie O, Song A G, Yao J, et al. Study on hydrodynamics of a flexible fishlike foil undulating in wall effect[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, 14(1): 593–606.
- [33] Xie O, Song A G, Zhu Q X, et al. Study on the hydrodynamics of carangiform swimming in a narrow channel[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2022, 46: 805–816.
- [34] 李永成, 王健, 陈纪军. 考虑壁面效应的摆动翼推进特性数值模拟[J]. *船舶与海洋工程*, 2020, 36(2): 26–31.  
Li Y C, Wang J, Chen J J. Numerical investigation of pitching foil's propulsive performance with wall effect[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020, 36(2): 26–31. (in Chinese)
- [35] 刘恒, 孙硕. 筒壁效应对二维水翼水动力性能的影响[J]. *上海船舶运输科学研究所学报*, 2022, 45(4): 8–12.  
Liu H, Sun S. Impact of wall effects on the hydrodynamic performance of two-dimensional hydrofoil[J]. *Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute*, 2022, 45(4): 8–12. (in Chinese)
- [36] 初文华, 员庆, 郭慧琴, 等. 基于数值的鲫鱼游泳能力影响参数分析[J]. *工程科学与技术*, 2023, 1–13.

- Chu W H, Yun Q, Guo H Q, et al. Analysis of parameters influencing swimming ability of crucian carp based on numerical simulation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023: 1–13. (in Chinese)
- [37] Quinn D B, Moored K W, Dewey P A, et al. Unsteady propulsion near a solid boundary[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 742: 152–170.
- [38] Mivehchi A, Dahl J, Licht S. Heaving and pitching oscillating foil propulsion in ground effect[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 63: 174–187.
- [39] Kurt M, Cochran-carney J, Zhong Q, et al. Swimming freely near the ground leads to flow-mediated equilibrium altitudes[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 875: R1.
- [40] 张海潮, 代 钦. 曲面附近的机翼地面效应和流场结构的实验研究[J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2021, 36(2): 210–220.
- Zhang H C, Dai Q. Experimental study on the ground effect and flow field structure of wing near the curved surface[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2021, 36(2): 210–220. (in Chinese)
- [41] Xie O, Yao J, Fan X Z, et al. Numerical and experimental study on the hydrodynamics of a three-dimensional flapping caudal fin in ground effect[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 260: 112049.
- [42] Ogunka U E, Daghooghi M, Akbarzadeh A M, et al. The ground effect in anguilliform swimming[J]. *Biomimetics*, 2020, 5(1): 9.
- [43] Zhang Y R, Kihara H, Abe K. Three-dimensional simulation of a self-propelled fish-like body swimming in a channel[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2018, 12(1): 473–492.
- [44] Xue G, Bai F G, Guo L, et al. Research on the effects of complex terrain on the hydrodynamic performance of a deep-sea fishlike exploring and sampling robot moving near the sea bottom[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1091523.
- [45] 谢 鸥, 朱其新, 蒋全胜, 等. 仿生机器鱼靠壁游动的壁面效应特性研究[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2018, 46(11): 59–63.
- Xie O, Zhu Q X, Jiang Q S, et al. Study on wall effect of near wall swimming of biomimetic robot fish[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2018, 46(11): 59–63. (in Chinese)
- [46] Ma H W, Ren S, Wang J X, et al. Research on the influence of ground effect on the performance of robotic fish propelled by oscillating paired pectoral fins[J]. *Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application*, 2021, 48(1): 133–141.
- [47] 于鹏垚, 张博然, 赵 勇, 等. 楔形体入水冲击中的壁面效应分析[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(6): 73–78.
- Yu P Y, Zhang B R, Zhao Y, et al. Analysis on wall effect during water entry of wedge[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2019, 47(6): 73–78. (in Chinese)
- [48] 程 丽, 罗庆杰, 张 亮, 等. 三维钝体的近壁面受力[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2008, 23(2): 149–157.
- Cheng L, Luo Q J, Zhang L, et al. On the forces of 3D blunt-end bodies near wall[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2008, 23(2): 149–157. (in Chinese)
- [49] 潘 光, 吴文辉, 胡海豹, 等. 水下柱体近壁过程数值仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(3): 335–339.
- Pan G, Wu W H, Hu H B, et al. Numerical simulation research of a cylinder approaching to the plan wall[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(3): 335–339. (in Chinese)
- [50] Yuan Z M, Zhang X S, Ji C Y, et al. Side wall effects on ship model testing in a towing tank[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 447–457.
- [51] 薛壮壮, 王企鲲, 钱佳杰, 等. 半无界流场中圆球壁面升力和阻力的特性研究[J]. *水动力学研究与进展 (A 辑)*, 2019, 34(5): 664–673.
- Xue Z Z, Wang Q K, Qian J J, et al. Characteristics of wall lift and drag of a spherical particle in semi-unbounded flow field[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2019, 34(5): 664–673. (in Chinese)
- [52] Kumar M, Subramanian V A. A numerical and experimental study on tank wall influences in drag estimation[J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(1): 192–205.
- [53] Huang H, Zhou Z X, Li H W, et al. The effects of the circulating water tunnel wall and support struts on hydrodynamic coefficients estimation for autonomous underwater vehicles[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020, 12: 1–10.
- [54] 张 亮, 程 丽, 李凤来, 等. 二维扁卵形体近壁面水动力干扰实验[J]. *船舶力学*, 2006, 10(6): 1–10.

- Zhang L, Cheng L, Li F L, et al. Experiment on hydrodynamic interaction between 2D oval and wall[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2006, 10(6): 1–10. (in Chinese)
- [55] 刘 晗, 马 宁, 顾解仲. 考虑侧壁效应修正的循环水槽船模斜航试验水动力计算[J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(2): 142–149.
- Liu H, Ma N, Gu X C. Calculation of the hydrodynamic forces of ship model oblique towing test in circulating water channel by considering side wall effect correction[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2017, 51(2): 142–149. (in Chinese)
- [56] 曾 岑, 仇亚斌, 刘 健, 等. 有限水域水下载器推力模型实验壁面效应研究[J]. *应用科技*, 2023, 50(4): 8–13.
- Zeng C, Zhang Y B, Liu J, et al. A study on wall effect of thrust model experiment of an underwater vehicle in limited waters[J]. *Applied Science and Technology*, 2023, 50(4): 8–13. (in Chinese)
- [57] DeVries L, Lagor F D, Lei H, et al. Distributed flow estimation and closed-loop control of an underwater vehicle with a multi-modal artificial lateral line[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 10(2): 1–15, 2015.
- [58] Clark, Jack H. Passive object detection via an artificial lateral line and a 2D viscous flow model[R]. University of Rhode Island, United States, 2018.
- [59] Yen W K, Sierra D M, Guo J. Controlling a robotic fish to swim along a wall using hydrodynamic pressure feedback[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(2): 369–380.
- [60] Yen W K, Guo J. Wall following control of a robotic fish using dynamic pressure[C]//OCEANS 2016, Shanghai. IEEE, 2016: 1–7.
- [61] Yang Z, Gong Z, Jiang Y, et al. Maximized hydrodynamic stimulation strategy for placement of differential pressure and velocity sensors in artificial lateral line systems[J]. *IEEE Robot. Automation Lett*, 2022, 7: 2170–2177.
- [62] Zheng X W, Wang C, Fan R F, et al. Artificial lateral line based local sensing between two adjacent robotic fish[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 13(1) : 016002.
- [63] 谢 鸥, 宋爱国, 苗 静, 等. 仿生机器鱼近壁面流场识别的人工侧线方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(9): 164–170.
- Xie O, Song A G, Miao J, et al. Near wall flow recognition method for bionic robot fish based on artificial lateral line[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(9): 164–170. (in Chinese)
- [64] 姚 吉, 谢 鸥, 葛飞飞, 等. 机器海豚近地面非对称腹背式推进俯仰抑制方法[J]. *船舶工程*, 2022, 44(7): 77–83.
- Yao J, Xie O, Ge F F, et al. Pitch Suppression method of robotic dolphin swimming near ground with asymmetrical ventral and dorsal propulsion mode[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(7): 77–83. (in Chinese)
- [65] Daghooghi M, Borazjani I. The hydrodynamic advantages of synchronized swimming in a rectangular pattern[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(5): 056018.
- [66] Ashraf I, Bradshaw H, Ha T T, et al. Simple phalanx pattern leads to energy saving in cohesive fish schooling[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(36): 9599–9604.
- [67] Dai L Z, He G W, Zhang X, et al. Stable formations of self-propelled fish-like swimmers induced by hydrodynamic interactions[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2018, 15(147): 20180490.
- [68] Boschitsch B M, Dewey P A, Smits A J. Propulsive performance of unsteady tandem hydrofoils in an in-line configuration[J]. *Physics of Fluids*, 2014, 26(5): 051901.
- [69] Desai J P, Ostrowski J P, Kumar V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots[J]. *IEEE Trans on Robotics & Automation*, 2002, 17(6): 905–908.
- [70] Jia Y, Wang L. Leader-follower flocking of multiple robotic fish[J]. *IEEE Trans on Mechatronics*, 2015, 20(3): 1372–1383.
- [71] Jia Q, Li G. Formation control and obstacle avoidance algorithm of multiple autonomous underwater vehicles( AUVs) based on potential function and behavior rules[C]//2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2007: 569–573.