

文章编号: 1001-4888(2022)04-0561-12

草鱼幼鱼常规转弯过程的游泳动力特征分析^{*}

黄慧玲^{1,2}, 胡晓^{1,2}, 张奔³, 杨国党⁴, 龙泽宇^{1,2}, 石小涛^{1,2}

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学 湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 湖北宜昌 443002;
3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200050; 4. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 西藏拉萨 850008)

摘要: 为研究幼鱼在常规转弯过程中的推、阻力形成过程, 本文以草鱼幼鱼(*Ctenopharyngodon idella*)为研究对象, 利用 PIV(Particle Image Velocimetry)对转弯过程中“C”形弯曲阶段和回摆阶段幼鱼鱼体周身的压力分布, 以及分别由流体正、负压形成的推、阻力和侧向力变化规律进行分析。结果表明: 草鱼幼鱼在整个转弯过程中平均能产生 $118.05\mu\text{N}$ 的推力, 其中 53.99% 来源于尾部, 鱼体受到的平均阻力达到 $99.16\mu\text{N}$, 鱼体中部产生的阻力占比高达 54.70%。在“C”形弯曲阶段, 幼鱼周身分布的流体负压产生的推力占比达 61.56%, 是主要的推力形成来源, 此时侧向力增大为幼鱼鱼体转弯提供必要的向心力以完成大部分的转弯动作, 草鱼幼鱼做加速运动; 在回摆阶段, 草鱼幼鱼周身流体正压产生的推力占比高达 73.80%, 此时侧向力迅速减小为 0, 然后上升以阻止鱼体的继续转动, 幼鱼做减速运动。

关键词: PIV; 转弯; 流体压力; 推力; 阻力; 侧向力

中图分类号: Q811.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-210

0 引言

在“物竞天择, 适者生存”的自然法则下, 鱼类各自进化出一套高机动性、低能耗的游动方式, 是目前仿生机器鱼与水下航行器难以达到的。长时间来, 人类学者通过研究鱼类游动的规律与特性, 并以此为依据优化仿生鱼的设计以及水下航行器的性能。鱼类游动的姿态有很多种: 巡游、滑行、转弯、跳跃等, 其中转弯在鱼类游动中扮演着最重要的角色, 有些鱼类一生中很大一部分的时间在进行转弯游动。转弯可根据转弯角速度大小简单分为快速转弯和常规转弯(角速度 $> 1^\circ/\text{ms}$ 为快速转弯, 角速度 $< 1^\circ/\text{ms}$ 为常规转弯)^[1]。快速转弯是早期许多学者研究的主要行为, 此行为与捕食行为、逃逸行为等极端行为联系密切, 常被归类于快速启动行为中进行研究^[2]。快速启动由于转弯前期身体形态的不同分为“C”形启动和“S”形启动, 近年来许多学者对此类转弯的运动学特征、涡动力学、流体动力学等方面进行了研究^[3-6]。对极端行为的研究有助于探寻鱼类特定行为下的特征和规律, 但极端行为在鱼类一生的游动中占比较少, 绝大部分时间鱼类都在进行常规转弯行为, 常规转弯行为的动力学特征普适性较强, 能为仿生机器鱼和水下航行器的设计带来更大的参考价值, 故本文将常规转弯作为主要研究方向。

较之极端行为, 常规转弯的相关研究较少。最近学者逐渐重视常规转弯这种具有慢速或中速特点的、自发且不剧烈的机动游泳状态, 常规转弯可分为单摆尾转弯和巡游转弯^[2], 单摆尾转弯是鱼类自由游动转弯时最常用的方式, 本文实验中获得的所有样本均为单摆尾转弯, 不排除因为实验装置大小原因

^{*} 收稿日期: 2021-09-09; 修回日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679126, 51609125); 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51922065); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201703)

通信作者: 胡晓(1983—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要从事水力学研究。Email: 25098547@qq.com

导致的巡游转弯行为的 0 发生率。对常规转弯的实验观测工作除了可以定性分析逃逸转弯和常规转弯的异同^[7]外,更多的是为了证实前人的结论^[8],定量的分析由于估算方法的限制,早年间的研究局限于分析运动学参数之间的关系,且因为测量分析鱼类游动时产生的流场的过程较为复杂,同时也受到测量方法的限制,直到近年才有一些尝试^[9,10]。如 Clos 等^[11]使用 2DPIV 技术定量分析了海鳗(*Muraenesox cinereus*)稳定游动和静止加速行为的推力产生;Wise 等^[12]对动水条件下蓝鳃太阳鱼(*Lepomis macrochirus*)加速游动行为的周身流动进行量化,分析线加速度与水动力学的相关性;Lucas 等^[13]量化了蓝鳃太阳鱼(*Lepomis macrochirus*)和鳟鱼(*Salmo playtcephalus*)不同鱼体部位的压力分布,研究了鱼体利用翼型头部形状对头部产生的推力。对于鱼类转弯产生的流场进行测量分析是一项复杂而又困难的工作,Sakakibara 等^[14]利用立体 PIV(Stereoscopic PIV)测得了鲫鱼(*Carassius auratus*)转弯尾迹中的三维速度分布,并估算了尾涡的尺寸和三维速度矢量;Drucker 等^[15]定量分析了太阳鱼(*Lepomis gibbosus*)利用胸鳍转弯时产生的流场结构和两侧流体力的大小方向,并详细阐述了胸鳍的转弯机制;Wu 等^[16]量化了鲤鱼(*Cyprinus carpio*)常规转弯过程的运动学与动力学特征,并结合转弯角速度分析其相关性;Thandiackal 等^[9]利用红外 PIV 技术定量分析了斑马鱼(*Brachydanio rerio var*)不同角度转弯周身压力分布,并对比分析了推力、机械功等动力学特征的差异性。综上所述,目前对于鲹科式鱼类常规转弯机制的分析主要集中在转弯角度和角速度与水动力学各项参数的影响上,实验研究和定量动力学分析范围都远远不够,且从未分析鱼体不同部位在常规转弯游动中做出的不同贡献,对不同流体压力与鱼类转体和推进的关系也还没有专门的研究,故针对鱼体在转弯过程中不同部位、不同流体压力的动力学特征进行实验分析显得十分重要。

由于 PIV 装置视野的限制,本研究选用幼鱼作为实验对象,鲤科鱼类幼鱼除了游泳能力与成鱼相差较大^[17]外,其转弯机制与成鱼相差不多,均为鲹科式推进方式。本文通过对草鱼幼鱼的自由游泳过程进行多次跟踪实验,获得了幼鱼在常规转弯状态下的多个实验样本,利用 PIV 技术量化草鱼幼鱼常规转弯过程中不同鱼体部位的压力分布与其他动力学参数,重点分析了草鱼幼鱼不同部位的受力特征与机动性,相关研究成果将有助于加深对鱼类运动机理的认识和理解,对鱼类仿生学和水下航行器的研究和应用有一定参考意义。

1 材料与方法

1.1 实验对象选择

草鱼幼鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)是本文实验选定的对象,属于鲤科鱼类,与草鱼成鱼一样都是典型的鲹科式鱼类,其典型的鲹科式推进方式在鲤科鱼类中极具代表性,鱼体轮廓曲线也是我国四大家鱼代表。草鱼广泛分布于我国平原地区的江河湖泊^[18],有庞大的下行洄游需求,但部分过鱼设施效果并不理想,且目前国内对其幼鱼转弯的游泳动力学机制尚不明确,因此,分析其发生单摆尾转弯行为和形成流体力的过程,能为鲤科鱼类的转弯动力学研究提供一定的参考,并为部分过鱼设施进口诱鱼提供基础力学数据支撑。本文实验的实验对象购于宜昌市小林渔业,实验场地为三峡大学生态水利学实验室,实验对象体长范围为 $7\text{cm} \pm 1.5\text{cm}$,共 50 尾,暂养在圆形水槽(直径为 2m,水深 0.3m)中,水温为 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,实验过程中严格遵守《实验动物管理条例》,实验前 24h 禁止喂食。

1.2 实验装置与材料

实验在静水条件下进行,采用透明的有机玻璃水槽,水槽的长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 $34.5\text{cm} \times 20\text{cm} \times 10\text{cm}$,如图 1 所示。在水平面上 30cm 处安装一台高速摄像机(型号为 Casio EX10,其分辨率及帧率参数为 $1280\text{pixel} \times 720\text{pixel} @ 120\text{Hz}$,快门速度为 $\frac{1}{240}\text{s}$),摄像机垂直向下拍摄,视野范围为 $10\text{cm} \times 5.6\text{cm}$ 。实验前,将 PIV 专用示踪粒子(空心玻璃微珠^[19],密度为 $1.02\text{g}/\text{cm}^3$,直径为 $10\mu\text{m}$)充分搅拌到水槽中,空心玻璃微珠密度与水体相似,可长时间均匀地散布在实验水体中。将诺青激光器 NQ-506(波长为 532nm,光片厚度约为 0.5mm)固定在玻璃水槽一侧的激光校准器上,发射的线状激光通过图 1(a)中的 D 形柱透镜发散为面光源。实验中发现草鱼幼鱼持续在水槽底部游动,故布置水平面光源于槽底上方

1cm 处以照亮该平面示踪粒子,即照亮鱼体中线平面上的粒子,待水槽中示踪粒子静止,将草鱼幼鱼放入水槽中适应 10min 后开始实验。

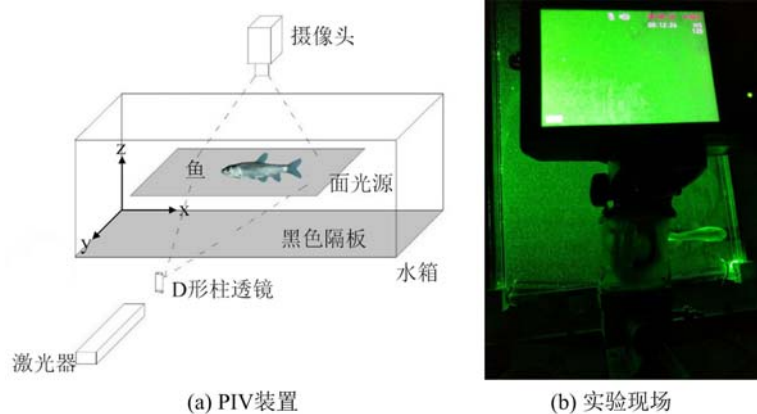


图1 实验装置及实验现场图

Fig. 1 Experimental device and experimental site map

实验通过高速摄像机记录草鱼幼鱼在激光平面中的无干扰常规转弯行为,由于草鱼幼鱼在水体中易出现俯仰游动,俯仰游动过程中,激光打在倾斜的鱼体上,此时激光平面二维 PIV 粒子的流动无法代表该行为的流场变化,伴随俯仰行为的转弯不在本研究范围之内,且平面常规转弯时中线不一定位于激光平面处,故本研究的实验以记录到激光平面完整转弯行为为目标。拍摄一组实验视频的时间以 2min 为限,若捕捉到草鱼幼鱼在激光平面中的完整转弯行为则该组实验有效,反之无效,一组实验后间隔 1min 进行下一组实验,每条实验鱼进行 10 组实验。最终记录了总共 134 次转弯行为,其中有 28 次转弯行为被选择用于运动学和动力学的完整分析。选择转弯的 2 个标准为:(1)草鱼幼鱼在激光平面中且鱼体平行于水面的转弯;(2)草鱼幼鱼转弯时胸鳍紧贴身体。因为本研究主要聚焦于二维平面内鱼体各部位在转弯过程中的贡献,所以要尽可能排除草鱼幼鱼俯仰游动对二维 PIV 计算造成的误差,并减少鱼鳍对转弯行为的影响。

为减小 PIV 流场测量误差,在水槽底部粘贴黑色胶布以抑制鱼体表面在激光照射下产生的眩光对粒子运动图像的影响^[20],确保实验背景与明亮的鱼体形成强烈的对比度。本文实验主要研究的鱼类行为是常规转弯,为了保证常规转弯的自主性,实验要在无外界干扰的条件下开展,将水槽侧面(除激光器和摄像机侧)贴上防水黑色胶布,并在黑暗无声的环境下进行实验,以削弱外界声、光条件对实验鱼的影响。

对比不同体长幼鱼发生的不同转体速度下的各转弯行为,发现在相同实验条件下,草鱼幼鱼常规转弯时虽在动力学数值上有些差异,但其运动学特征与动力学规律都有极高的相似性,故本研究从样本数据库中抽取一组典型常规转弯数据(体长为 7.3cm,阶段一平均转弯角速度为 -6.81rad/s ,阶段一的定义请参见 2.1 小节)代表实验结果进一步分析。

1.3 数据提取方法

1.3.1 速度场及压力场数据获取

相机拍摄的粒子图像通过专门的 PIV 软件计算得到速度场和涡量场分布。本文选用 Thielicke 等^[21]开发的“PIVlab”软件包,将原始视频帧导入 PIVlab2.31 进行处理以获得速度数据。通过对速度场积分可以计算流体压力的梯度分布,然后将压力数据导入 surfer 软件中提取草鱼幼鱼周身的流体压力。具体方法如下:首先沿二维流体坐标积分速度场,以获得摄像机视野范围内的压力场,然后导入 surfer 软件中沿头尾方向提取流固边界线上的压力。为了使累积误差最小化,采用 Dabiri 等^[22]的直接积分法,使速度场沿着 8 个不同的方向积分取其平均值,此方法的准确性已在先前量化游动鳗鱼和水母周围压力场的研究中得到验证^[23,24]。例如求 z 点的压力值,可从有限体上(U)、下(D)、左(L)、右(R),左上(LU)、左下(LD)、右上(RU)及右下(RD)路径(见图 2)分别进行积分,平均 8 个路径的压力后即可

获得

$$p_z = \frac{1}{8} [(p_U + \Delta p_U) + (p_D + \Delta p_D) + (p_R + \Delta p_R) + (p_L + \Delta p_L) + (p_{LU} + \Delta p_{LU}) + (p_{LD} + \Delta p_{LD}) + (p_{RU} + \Delta p_{RU}) + (p_{RD} + \Delta p_{RD})] \quad (1)$$

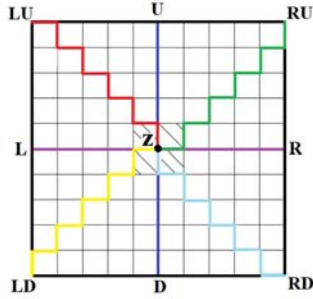


图 2 积分路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of integration path

1.3.2 推、阻力计算原理

直接测量幼鱼运动过程中的游泳动力很困难,本文采用一种结合压力场的算法来获取这些力的数据。当平面外流动与平面流动相比较小时,即激光照射草鱼幼鱼中线时,幼鱼保持该高度水平游动,而不发生俯仰行为,压力效应充分主导剪切效应,这种方法能够准确再现草鱼幼鱼所经历的游泳动力大小。为了更详细地分析鱼体不同部位所受游泳动力,将鱼体划分为 3 个部位: L 为鱼体体长,鱼体 0~0.2L 部分为头部(即吻部至胸鳍部位),0.7L~1.0L 部分为尾部(即臀鳍至尾鳍部位),其余部位为中部(即胸鳍至臀鳍部位)^[25]。

根据流体力学理论,作用在鱼体身上的流体力可表示为作用在鱼体表面的压力和剪切(黏性)力之和^[26]:

$$F(t) = - \int n p dA + \int \tau \cdot n dA \quad (2)$$

相应的力矩公式为

$$T(t) = - \int p(r \times n) dA + \int \tau \times (r \cdot n) dA \quad (3)$$

式中: $F(t)$ 为对应时间点鱼体-流体相互作用力,即流体力, μN ; $T(t)$ 为对应时间点鱼体所受流体力矩, $\mu\text{N} \cdot \text{mm}$; t 为周期内各时间点, ms ; $\mathbf{n}$ 为法向单位矢量,表示垂直鱼体向外的方向; p 为鱼体周身流体压力, Pa ; A 为草鱼对应节段鱼体表面积, mm^2 ; τ 为黏性应力张量, Pa ; r 为力到质心的垂直距离,即力矩臂, mm 。

流体的压力效应是造成鱼体-流体相互作用力的主要原因,剪切力效应远小于压力效应^[10,27],故通过流体压力可精确估计鱼体不同部位所受流体力。假设鱼体所受流体压力为中线平面上的压力,且流体压力沿深度方向均匀分布^[13],本文通过草鱼幼鱼相应部位的表面积 A 和鱼体-流体边界处的流体压力值 p 计算鱼体-流体相互作用力 F ,力的方向为鱼体-流体边界的法线方向。鱼体-流体相互作用力计算中的鱼体表面积采用与文献^[28]类似的方法来估算,将鱼体沿着中线等距分割成 200 份近椭圆薄片,每一份的侧面积为鱼体-流体相互作用力计算中对应的鱼体表面积,通过拾取鱼的体高 $2a$ 和体宽 $2b$ 计算椭圆半周长,再由薄片厚度 δ 获得半椭圆圆柱体的面积 A (见图 3)。每份薄片的鱼体-流体相互作用力为

$$F = p \cdot A \quad (4)$$

该相互作用力可分解为前进方向和垂直方向上的分力,鱼体前进方向上的流体力分量推、阻力 F_x (其中与鱼体前进方向相同的力为正,定义为推力;与鱼体前进方向相反的力为负,定义为阻力)为

$$F_x = \sum_{i=1}^n p_i A_i \sin \theta_i \quad (5)$$

垂直于前进方向上的流体力分量侧向力 F_y 为

$$F_y = \sum_{i=1}^n p_i A_i \cos \theta_i \quad (6)$$

鱼体不同部位流场变化差异性巨大,在整个鱼体受力均值计算中,需先将鱼体头、中、尾部分别计算平均力以增强均值对于分布数列的代表性,再进一步对不同鱼体部位的推、阻力均值求和。

1.3.3 游泳效率计算原理

在 Borazjani 等^[29]所述的 Froude 流体效率理论中,推力 F 与游泳速度 U 乘积的物理意义为鱼游的

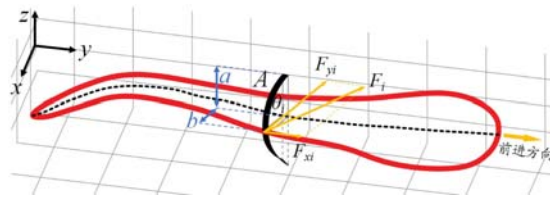


图3 流体作用力计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fluid force calculation

瞬时有效功率, 瞬时功率为侧向运动损耗的功率, 总瞬时功率等于有效功率与损失功率之和, 因此鱼游的瞬时游泳效率 η 为

$$\eta = \frac{FU}{FU + P_{lat}} \quad (7)$$

$$P_{lat} = - \int p(\mathbf{j} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{j} \cdot \mathbf{u} dA \quad (8)$$

式中: F 为前进方向上鱼体所受总推力, μN ; u 为鱼体上每一点的瞬时速度, mm/s ; U 为平均游泳速度, mm/s , 是同组数据中临帧质心位移对时间的比值; p 为鱼体相应部位所受流体压力, Pa ; P_{lat} 为鱼侧向运动损耗的功率, μW ; $\mathbf{n}$ 代表法向单位矢量; $\mathbf{j}$ 为侧向方向的单位矢量; A 为草鱼对应节段鱼体表面积, mm^2 。

2 结果与分析

2.1 草鱼幼鱼周身流体压力分布

通过分析草鱼幼鱼转弯过程中身体形态的规律可以发现, 一个完整的转弯周期分为 2 个阶段: 阶段一为幼鱼从平直状态至鱼体弯曲最大时, 即“C”形弯曲阶段(图 4(a)~(d)); 阶段二为幼鱼弯曲最大后回摆至平直状态, 即回摆阶段(图 4(e)~(i))。草鱼幼鱼在不同偏移角度下的转弯呈现出相似的周身压力变化模式。在“C”形弯曲阶段初期, 鱼体中部两侧流体产生的正压较之负压稍大, 形成促使鱼体向上转弯的流场趋势(图 4(a)), 后随着中部的弯曲程度变大, 鱼体弯曲内侧产生强大的流体负压, 使得水流向幼鱼鱼体(图 4(b)~(d))。在回摆阶段, 随着幼鱼转弯角速度的减慢, 幼鱼中部弯曲内侧的流体压力由负压转为正压, 鱼体头部弯曲内侧的流体压力从正压转为负压(图 4(e)~(i))。转弯过程中头部始终顶流游动且尾部始终强力推动鱼体后方流体, 故 2 个部位均出现明显的流体正压区(图 4(b)~(i)), 其中幼鱼尾部的流体正压会形成推动幼鱼前进的力。

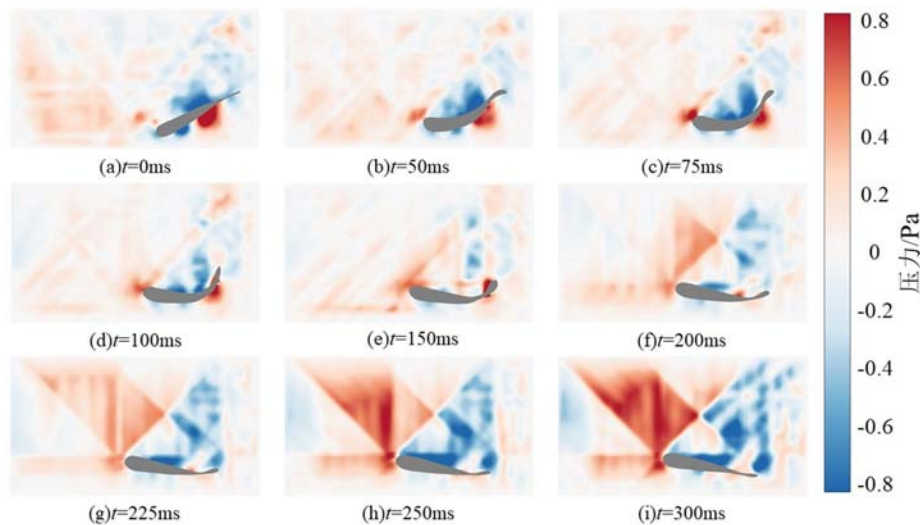


图4 转弯游泳期间鱼体周身压力云图

Fig. 4 Pressure cloud map of fish body during turning swimming

2.2 推、阻力的变化规律

2.2.1 推、阻力随时间的变化特征

转弯游泳期间草鱼幼鱼受到的推、阻力随时间的变化规律如图 5 所示,“C”形弯曲阶段(即图 5 中阶段一),幼鱼周身流体正压产生的推力变化较平稳,而流体负压产生的推力呈先增后减趋势,且流体负压产生的推、阻力要远高于流体正压;在回摆阶段(即图 5 中阶段二),流体正压和负压的推力均呈现逐渐减小的变化趋势,但正压产生的推力要略高于负压;在整个转弯过程中,鱼体所受正、负压阻力之和几乎保持稳定,正压阻力和负压阻力交替上下波动,而推力具有较大的波动,特别是负压推力。总的来说,“C”形弯曲阶段,幼鱼周身的流体负压是推力的主要形成来源,其占比达 61.56%,回摆阶段幼鱼周身的流体正压产生的推力占比则高达 73.80%。

流体正压合力、负压合力以及正、负压共同作用得到的净作用力变化曲线如图 6 所示,可以看出,“C”形弯曲阶段流体正压的综合作用表现为推力,而流体负压仅在弯曲前期表现为阻力,该阶段推力起较大的作用,净作用力呈先增后减趋势,始终大于 0,净作用力与鱼体转弯游泳速度(以 $\text{bl} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位,bl 为一倍鱼体体长)直接相关,故幼鱼在该阶段呈现为加速度先增大后减小的加速运动;在回摆阶段,流体负压合力和净作用力均表现为阻力,流体正压合力趋近于 0,该阶段摆尾幅度慢慢减小,加速度为负值且持续下降,前期尾部挤压侧后方水体以获取一定的反作用力推力,后期鱼体形态几乎没有变化,推力也趋近于 0,草鱼幼鱼在负压阻力的影响下做前进方向近乎不变的减速运动。

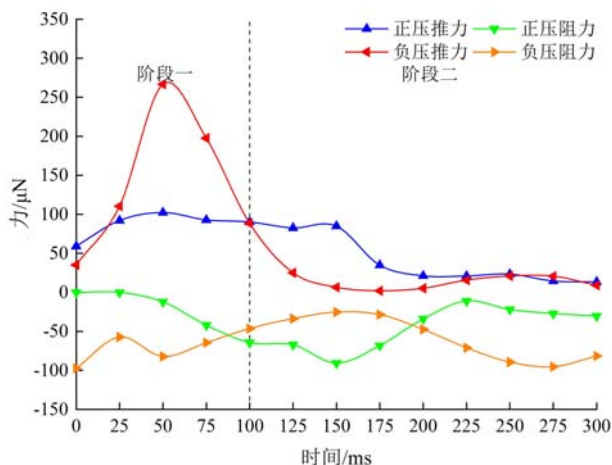


图 5 流体正、负压推力和阻力变化曲线

Fig. 5 Positive and negative pressure thrust and resistance changes with time

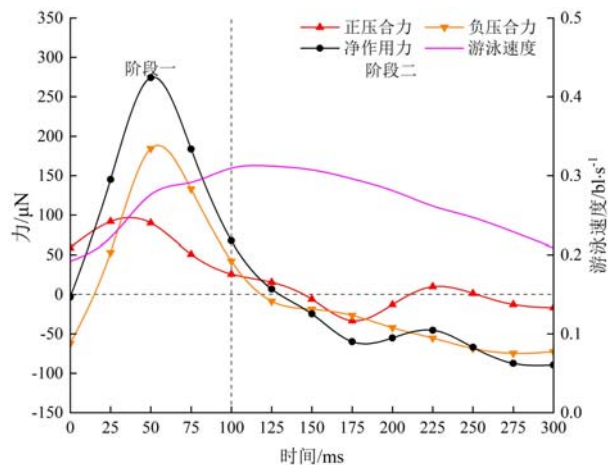


图 6 流体正、负压合力及净作用力变化曲线

Fig. 6 Changes in the resultant force of positive and negative pressure and net force over time

2.2.2 推、阻力沿鱼体长度方向变化特征

草鱼幼鱼转弯时鱼体各部位所受流体力差异很大,草鱼幼鱼周身受力需分节段计算分析,草鱼幼鱼周身流体压力所产生的推、阻力沿体长方向分布如图 7 所示,“C”形弯曲阶段由流体正压和负压产生的推力主要集中在鱼体后半段 $0.5L \sim 1.0L$ 处,鱼流体负压产生的阻力主要分布在鱼体 $0.2L \sim 0.6L$ 段;在回摆阶段,幼鱼所受到的阻力大部分集中在鱼体中间部位 $0.3L \sim 0.5L$ 处,推力主要集中在鱼体尾部 $0.8L \sim 1.0L$ 处。净作用力为推、阻力之和,由净作用力曲线趋势(图 7)可知,鱼体尾部净作用力始终比头、中部大,鱼体转弯前行的主要动力部位为鱼体尾部。

为明确转弯过程中鱼体头部、中部和尾部在游泳动力形成过程中所起的作用,图 8 给出了草鱼幼鱼不同部位的推、阻力大小及其占比。草鱼幼鱼转弯时不同阶段和不同部位所受流体力差异性较大,在鱼体平均产生的 $118.05 \mu\text{N}$ 推力中,尾部对推力贡献高达 53.99%,其次是中部 27.41%,头部对推力的贡献最小;鱼体所受的平均阻力为 $99.16 \mu\text{N}$,略小于推力,其中最大的阻力来源于鱼体中部,54.70%的阻力来源于中部。

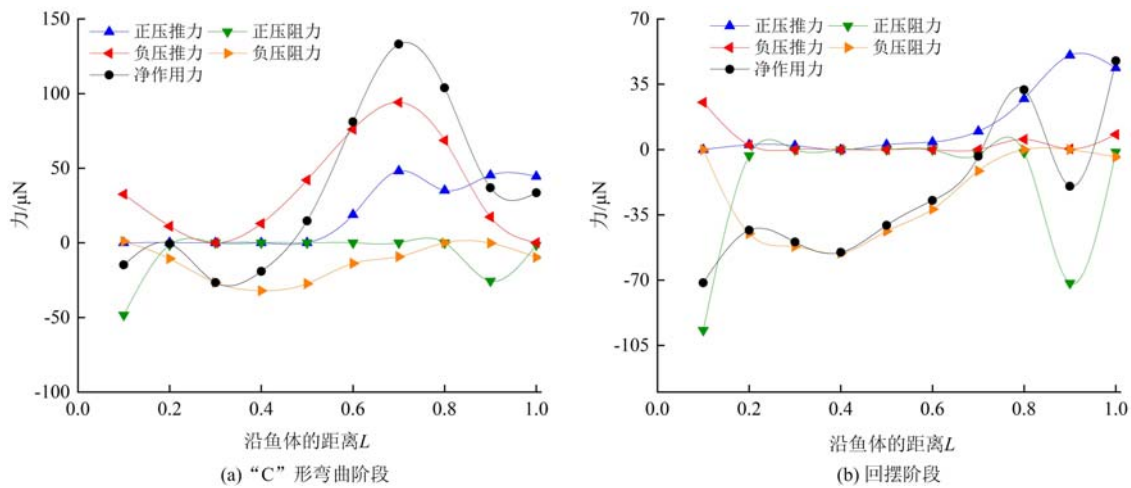


图7 不同阶段推、阻力沿体长的分布

Fig. 7 Distribution of thrust and drag along fish body length at different stages

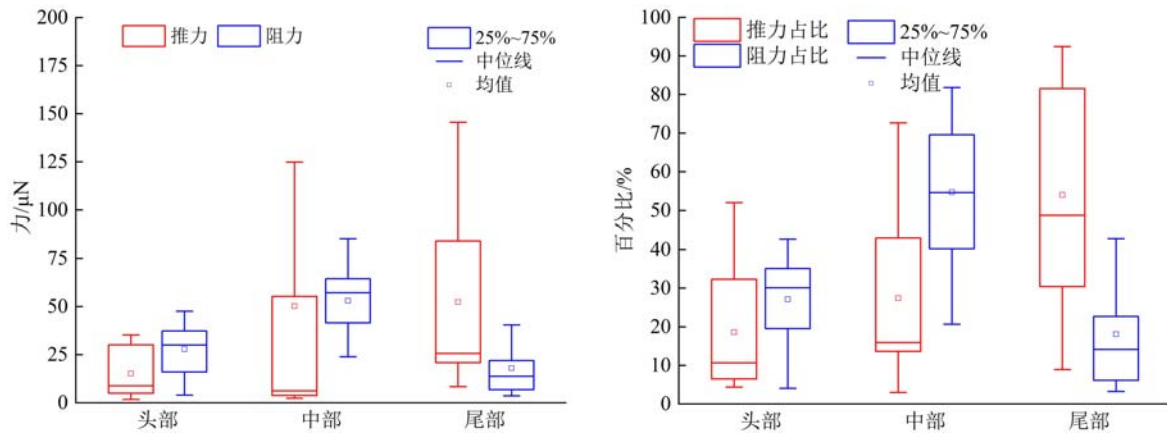


图8 鱼体各部位推、阻力大小及比例

Fig. 8 The magnitude and proportion of thrust and resistance of different parts of the fish body

2.3 侧向力及力矩变化特征

草鱼幼鱼转弯游泳时偏转角度会出现较大的变化,因此需考虑转弯过程中侧向力和力矩的变化,侧向力的大小能间接体现鱼体本身抵抗阻力而做出变化的能力^[30],力矩则是量度力对鱼体产生转动效应的物理量。在转弯游泳运动过程中,侧向力远大于推力和阻力,说明鱼体受到的环境水体压力绝大部分都转化为侧向力,总力矩中侧向力矩占绝大比例。

转弯游泳过程中草鱼受到的侧向力和力矩随时间的变化如图9所示,在“C”形弯曲阶段,鱼体在100ms的极短时间内改变了身体的弯曲程度,产生最大力矩的瞬间赋予草鱼幼鱼最大的初始角加速度,此时鱼体受到逐渐增大的侧向力,为转弯提供了必要的向心力,此阶段幼鱼转弯角速度增加促使鱼体完成大部分的转弯动作。在回摆阶段(100~300ms),力矩减小至0后逆时针增大,侧向力在30ms内迅速减小至0,鱼体仍然在小幅度转动,后侧向力开始反向迅速增大,角加速度呈负增长趋势使角速度减小,阻止鱼体转向的角度继续增长,同时产生较大的推力使鱼体向前做加速运动。

鱼体不同部位的侧向力如图10所示,鱼体中间部位聚集的侧向力平均达到 $367.23\mu\text{N}$,在总体平均侧向力中占比高达82.77%,尾部平均为 $61.34\mu\text{N}$,头部平均仅有 $15.13\mu\text{N}$ 。尾部摆动方向与鱼体前进方向存在较大夹角导致鱼体尾部所受流体压力绝大部分转化成了推力和阻力,鱼体头部可近似看做刚性体,不发生弯曲变化,侧向几乎不受力,故侧向力基本集中在幼鱼鱼体的中部。

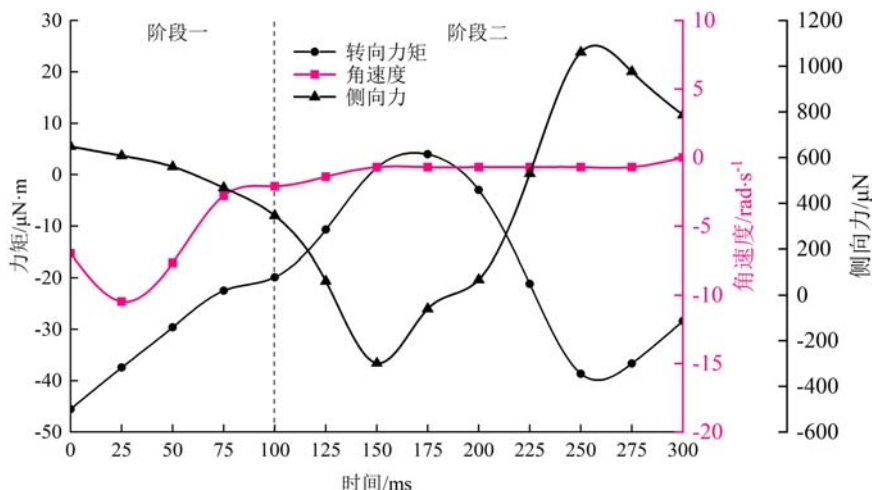


图 9 转向力矩、侧向力与角速度的变化曲线

Fig. 9 The response process of steering torque and angular velocity with time

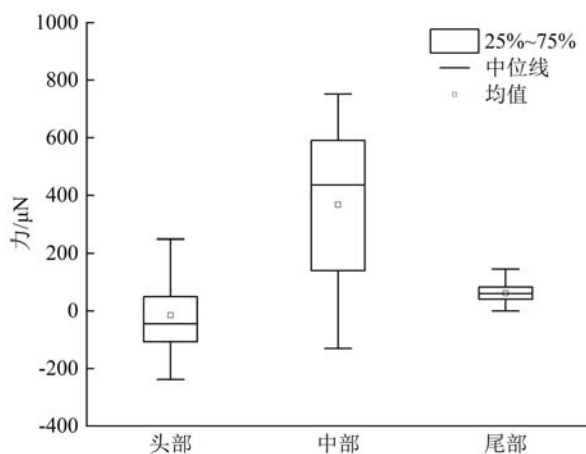


图 10 鱼体不同部位的侧向力变化

Fig. 10 The size of the lateral force of different parts of the fish body

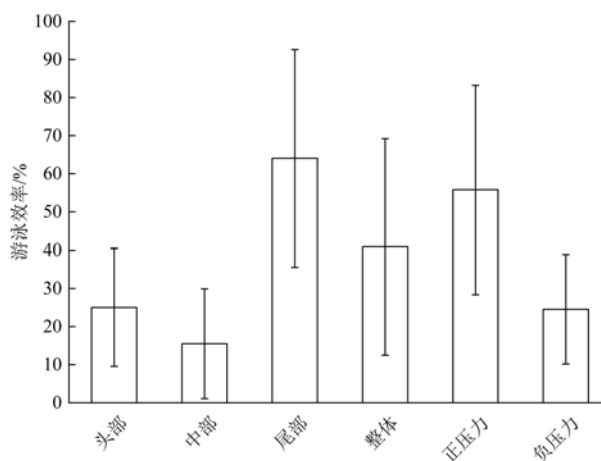


图 11 转弯游泳期间平均游泳效率

Fig. 11 Average swimming efficiency during turning swimming

2.4 游泳效率及机动性

游泳效率作为鱼类动力学研究的重要指标,一直以来都受到科学界的广泛关注。如图 11 所示,草鱼转弯游泳期间总体平均游泳效率为 $40.85 \pm 28.35\%$,鱼体头、中、尾部游泳效率分别为 $25.03 \pm 15.46\%$ 、 $15.50 \pm 14.42\%$ 、 $64.06 \pm 28.54\%$,有明显的差异性,特别是鱼体中部和尾部,尾部最为高效,游泳效率是中部的近 5 倍。此外,转弯过程中流体正压和流体负压所起的作用也大相径庭,流体正压主要作用于鱼体尾部,促使鱼体向前游动,流体负压主要作用于鱼体中部,为鱼体弯曲提供动力,正压力游泳效率也要高于负压力游泳效率。草鱼幼鱼转弯行为机动性与游泳效率密切相关,由图 5 的游泳速度曲线与图 9 的角速度曲线可知,常规转弯仅为了获得较大的转弯角度,并不追求高的质心速度,机动性与游泳效率呈现相互制衡的现象,为获取更大的转弯角度,就会进一步降低游泳效率。

3 讨论

3.1 转弯过程中幼鱼不同部位的受力特征

本文阐述的常规转弯游泳比鱼类的逃逸行为更为常见,且持续时间长。在转弯过程中,过去的研究主要聚焦于涡环、射流、压力对鱼类转弯行为的影响^[9,31-33],缺少对鱼体各部位的精细解读,故需要沿着鱼体长度进行力的计算测量,以确定鱼体尾部在推力产生中的相对作用。过去对鱼体不同部位在游泳

过程中作用的研究对象大部分是鳗鲡模式的鱼类,其中部分研究发现,鳗鲡形鱼类整个身体对推力的产生都有贡献^[29,34-37],但推力只在鱼体后半部分超过阻力^[11]。草鱼幼鱼与鳗鲡模式的鱼类是两种截然不同的推进模式鱼类,鱼体各部位对推力产生的影响必然不同,转弯形态也有显著性差异,因此对草鱼幼鱼转弯过程中幼鱼不同部位对推力产生的贡献度进行解析是十分必要的。

本文通过量化草鱼幼鱼周身的流体压力分布,明确了鱼体不同部位分别由流体正压和负压产生的推、阻力及侧向力对鱼类前行和转弯的作用,证实了流体正、负压和鱼体不同部位对游泳动力和力矩的产生均有显著贡献,由于草鱼幼鱼躯干在“C”形弯曲阶段有快速且较大的变化,在转弯内侧形成大的负压,该负压将鱼体尾部往前进方向拉扯,是促使鱼体前行的主要动力,故幼鱼周身的流体负压产生的推力占总推力的61.56%。摆尾阶段与前一阶段不同,摆尾阶段尾部向后拍打,紧密压缩尾部后方流体,造成较大的正压,该正压流体反向作用于尾部,推动鱼体前行,故该阶段流体正压的推力占比高达73.80%。与以往斑马鱼、蓝鳃太阳鱼转弯的相关研究相比^[9,38],有类似的鱼体两侧正负压区域变化规律。转弯过程中流体压力作用于鱼体尾部,尾部产生的推力在总推力中占53.99%,是推动鱼体前行的主要动力部位,草鱼幼鱼转弯时整体弯曲程度较大,鱼体的推、阻力分量急剧下降,此时流体正、负压产生的作用力大部分都转化成了侧向力,鱼体中部聚集的侧向力占比高达82.77%,是促进幼鱼转体的主要动力部位。这反映了在草鱼幼鱼转弯过程中,流体正压起推力主导作用,鱼体尾部正压对推力的产生有重大贡献,鱼体中部两侧的流体压力起转弯主导作用。现有仿生机器鱼设计追求直线行驶的推进效率^[39],本研究中鱼体不同部位的受力特征结果可为解决仿生机器鱼在转弯机动性行为中耗能太高且鱼体波动不稳定等问题提供一定参考。

3.2 鱼类不同游泳模式的动力学差异性

在不同流体环境下,鱼类能够灵活变通游泳策略来满足其瞬时需求,不同鱼类因其不同的游泳模式和外形轮廓具备不同的功能优势。近几年国内外学者研究最多的是稳定加速游泳及逃逸、捕食行为^[40,41]。Lucas等^[13]研究了蓝鳃太阳鱼及鳊鱼沿身体各部位的推力,认为鱼体利用前身类似于侧翻机翼的形态产生对其前身的推力。而关于常规游泳的研究大部分是将其与逃逸游泳结合比较分析,张冰冰等^[7]研究了斑马鱼逃逸转弯和常规转弯游泳的动力学特征,逃逸转弯的推力峰值是常规转弯的10倍,侧向力是常规转弯的2倍,顺时针力矩峰值是常规转弯的1.6倍,逆时针力矩峰值是常规转弯的4.5倍。

部分研究已证实,不同的游泳模式下鱼类根据身体形态变化达成获取不同功能优势的目标^[42-45],草鱼幼鱼为了应对自身不同的生存需求会选择不同的游泳模式,例如在长时间的迁徙和洄游期间,低能耗和高效率至关重要,在此期间鱼类会尽可能提高对能量的利用率,确保在相同的时间前进更远的距离;对于转弯这类强机动游泳,高机动性更为重要,特别是在捕食或逃逸期间,迅速转向才是其首要需求,其游泳效率自然要低得多,在Lucas等^[46]的柔性推进器研究中也证实,灵活性的提高会使整体推力降低,这也与本文鱼体转弯推力分量减小的结果类似。因此,不同游泳模式都有其特定的力学机制,游动期间的运动学和动力学必然会存在较大的差异性。与巡游游泳效率^[25]相比,草鱼幼鱼在转弯时的平均游泳效率为 $40.85 \pm 28.35\%$,比巡游状态下低了近50%。草鱼幼鱼转弯期间在300ms内转弯角度达 51° ,如此高机动性产生的原理以及高机动性状态下保持一定的推进效率是当前水下航行器发展所欠缺的,本研究可为当前小型水下航行器高机动性与高推进效率等问题提供最基础的力学数据支撑。

4 结论

本文采用PIV定量测量法对草鱼幼鱼不受外界刺激时的转弯机动运动过程进行实验观测,对拍摄到的28组有效运动序列图像进行数据处理,获得了草鱼幼鱼在转弯过程中的周身流体压力分布特征,并分别计算了鱼体不同部位流体正、负压产生的推、阻力及侧向力等动力学参数,得到以下结论:

(1) 草鱼幼鱼转弯过程中不同阶段动力来源不同,流体正压与负压交替成为鱼体前行游动的主要动力。“C”形弯曲阶段鱼体前行由流体负压提供61.56%主要推力,幼鱼持续加速;回摆阶段由流体正压主导,幼鱼做减速运动。

(2) 鱼体尾部的主要贡献在于产生前行游动的绝大部分推力,鱼体产生的平均 $118.05\mu\text{N}$ 的推力中,尾部提供了 53.99% 的推力,游泳效率高达 $64.06\pm 28.54\%$,侧向力的贡献几乎可以忽略不计。

(3) 鱼体中部的主要贡献在于为转弯动作提供主要侧向力,鱼体产生的平均 $443.7\mu\text{N}$ 的推力中,中部提供了 82.77% 的侧向力,几乎是鱼类转体动作的全部动力来源,此外也是鱼体所受阻力的最大来源,对草鱼幼鱼前行游动产生负影响。

参考文献:

- [1] Domenici P, Batty R S. Escape behaviour of solitary herring (*Clupea harengus*) and comparisons with schooling individuals[J]. Marine Biology, 1997, 128(1):29—38.
- [2] 杨焱. 锦鲤常规自由游动的流体力学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008 (YANG Yan. Flow physics of freely routine swimming of Koi carp[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008 (in Chinese))
- [3] Weihs D. The mechanism of rapid starting of slender fish[J]. Biorheology, 1973, 10(3):343—350.
- [4] Webb P W. The effect of size on the fast-start performance of rainbow trout *Salmo gairdneri*, and a consideration of piscivorous predator-prey interactions[J]. Journal of Experimental Biology, 1976, 65(1):157—177.
- [5] 敬军, 李晟, 陆夕云, 等. 鲫鱼 C 形起动的运动学特征分析[J]. 实验力学, 2004, 19(3):276—282 (JING Jun, LI Sheng, LU Xiyun, et al. The kinematic analysis of C-start in crucian carp (*Carassius auratus*) [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, 19(3):276—282 (in Chinese))
- [6] Tytell E D, Lauder G V. Hydrodynamics of the escape response in bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*[J]. Journal of Experimental Biology, 2008, 211(21):3359—3369.
- [7] 张冰冰, 余永亮. 斑马鱼“C”型起动中动力学特性的活体实验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(6):727—736 (ZHANG Bingbing, YU Yongliang. Living body experimental study of dynamic characteristics of zebrafish C-start swimming[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(6):727—736 (in Chinese))
- [8] Weihs D. A hydrodynamical analysis of fish turning manoeuvres[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1972, 182(1066):59—72.
- [9] Thandiackal R, Lauder G V. How zebrafish turn: analysis of pressure force dynamics and mechanical work[J]. Journal of Experimental Biology, 2020, 223(16):jeb223230.
- [10] 张永年. 基于涡量原理的草鱼幼鱼游泳行为及其动力学特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020 (ZHANG Yongnian. Study on swimming behavior and dynamics of juvenile grass carps based on vorticity principle[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020 (in Chinese))
- [11] Clos K, Dabiri J O, Costello J H, et al. Thrust generation during steady swimming and acceleration from rest in anguilliform swimmers[J]. Journal of Experimental Biology, 2019, 222(22):jeb212464.
- [12] Wise T N, Schwalbe M, Tytell E D. Hydrodynamics of linear acceleration in bluegill sunfish *Lepomis macrochirus* [J]. Journal of Experimental Biology, 2018, 221(23):jeb.190892.
- [13] Lucas K N, Lauder G V, Tytell E D. Airfoil-like mechanics generate thrust on the anterior body of swimming fishes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(19):201919055.
- [14] Sakakibara J, Nakagawa M, Yoshida M. Stereo-PIV study of flow around a maneuvering fish[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(2):282—293.
- [15] Drucker E, Lauder G. Wake dynamics and fluid forces of turning maneuvers in sunfish[J]. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(3):431—442.
- [16] Wu G, Yang Y, Zeng L. Routine turning maneuvers of koi carp *Cyprinus carpio koi*: effects of turning rate on kinematics and hydrodynamics[J]. Journal of Experimental Biology, 2007, 210(24):4379—4389.
- [17] 王永猛, 李志敏, 涂志英, 等. 基于雅砻江两种裂腹鱼游泳能力的鱼道设计[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2785—2792 (WANG Yongmeng, LI Zhimin, TU Zhiying, et al. Fishway design based on the swimming ability of two *Schizothorax* species in the Yalong River, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8):2785—2792 (in Chinese))
- [18] Cai L, Fang M, Johnson D, et al. Interrelationships between feeding, food deprivation and swimming performance in juvenile grass carp[J]. Aquatic Biology, 2014, 20(1):69—76.

- [19] 柯森繁, 石小涛, 王恩慧, 等. 简易粒子图像测速(PIV)技术开发与优化技巧[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(8):144—150 (KE Senfan, SHI Xiaotao, WANG Enhui, et al. Development and optimization skills of simple particle image velocimetry technology[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(8):144—150 (in Chinese))
- [20] Lucas K N, Dabiri J O, Lauder G V. A pressure-based force and torque prediction technique for the study of fish-like swimming[J]. PloS One, 2017, 12(12):e0189225.
- [21] Thielicke W, Stamhuis E. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. Journal of Open Research Software, 2014, 2(1):30—39.
- [22] Dabiri J O, Bose S, Gemmell B J, et al. An algorithm to estimate unsteady and quasi-steady pressure fields from velocity field measurements[J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217(3):331—336.
- [23] Gemmell B J, Fogerson S M, Costello J H, et al. How the bending kinematics of swimming lampreys build negative pressure fields for suction thrust[J]. Journal of Experimental Biology, 2016, 219(24):3884—3895.
- [24] Gemmell B J, Colin S P, Costello J H, et al. Suction-based propulsion as a basis for efficient animal swimming[J]. Nature Communications, 2015, 6(1):1—8.
- [25] 张奔, 胡晓, 杨国党, 等. 基于压力场的草鱼幼鱼巡游动力学研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(6):79—88 (ZHANG Ben, HU Xiao, YANG Guodang, et al. Hydrodynamics of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) in steady swimming based on pressure field[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(6):79—88 (in Chinese))
- [26] Fox R W, McDonald A T, Mitchell J W. Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics[M]. John Wiley & Sons, 2020.
- [27] Li G, Müller U K, van Leeuwen J L, et al. Body dynamics and hydrodynamics of swimming fish larvae: a computational study[J]. Journal of Experimental Biology, 2012, 215(22):4015—4033.
- [28] McHenry M J, Lauder G V. Ontogeny of form and function; locomotor morphology and drag in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Journal of Morphology, 2006, 267(9):1099—1109.
- [29] Borazjani I, Sotiropoulos F. Numerical investigation of the hydrodynamics of anguilliform swimming in the transitional and inertial flow regimes[J]. Journal of Experimental Biology, 2009, 212(4):576—592.
- [30] 童秉纲, 陆夕云. 关于飞行和游动的生物力学研究[J]. 力学进展, 2004, 34(1):1—8 (TONG Binggang, LU Xiyun. A review on biomechanics of animal flight and swimming[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(1):1—8 (in Chinese))
- [31] 张永年, 胡晓, 余英俊, 等. 基于涡量原理的草鱼幼鱼力学特性研究[J]. 实验力学, 2020, 35(5):915—924 (ZHANG Yongnian, HU Xiao, YU Yingjun, et al. Study on mechanical characteristics of grass carp juveniles based on vorticity method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(5):915—924 (in Chinese))
- [32] Mwaffo V, Zhang P, Cruz S R, et al. Zebrafish swimming in the flow: a particle image velocimetry study[J]. PeerJ, 2017, 5:e4041.
- [33] Li G, Müller U K, Leeuwen J V, et al. Escape trajectories are deflected when fish larvae intercept their own C-start wake[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2014, 11(101):20140848.
- [34] Carling J, Williams T L, Bowtell G. Self-propelled anguilliform swimming: Simultaneous solution of the two-dimensional Navier-Stokes equations and Newton's laws of motion[J]. Journal of Experimental Biology, 1999, 201(23):3143—3166.
- [35] Chen J, Friesen W O, Iwasaki T. Mechanisms underlying rhythmic locomotion: body-fluid interaction in undulatory swimming[J]. Journal of Experimental Biology, 2011, 214(4):561.
- [36] Müller U K, Smit J, Stamhuis E J, et al. How the body contributes to the wake in undulatory fish swimming: flow fields of a swimming eel (*Anguilla anguilla*) [J]. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(16):2751.
- [37] Videler J J, Müller U K, Stamhuis E J. Aquatic vertebrate locomotion: wakes from body waves[J]. Journal of Experimental Biology, 2000, 202(23):3423—3430.
- [38] Dabiri J O, Colin S P, Gemmell B J, et al. Jellyfish and fish solve the challenges of turning dynamics similarly to achieve high maneuverability[J]. Fluids, 2020, 5(3):106.
- [39] 戴云彤, 万宏, 徐继刚, 等. 单驱动仿生机器鱼动力特性的实验研究[J]. 实验力学, 2013, 28(3):326—332

- (DAI Yuntong, WAN Hong, XU Jigang, et al. Experimental study of dynamic characteristics of single actuated bionic robotic fish[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(3):326—332 (in Chinese))
- [40] 余英俊, 胡晓, 石小涛, 等. 基于 PIV 的拉萨裸裂尻摆尾压力场特征分析[J]. 实验力学, 2019, 34(2):289—300 (YU Yingjun, HU Xiao, SHI Xiaotao, et al. Analysis on the pressure field characteristics of schizopygopsis younghusbandi regan tail swinging based on PIV[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2):289—300 (in Chinese))
- [41] 吴燕峰, 贾来兵, 尹协振. 斑马鱼 S 型起动运动学研究[J]. 实验力学, 2007, 22(5):519—526 (WU Yanfeng, JIA Laibin, YIN Xiezheng. The kinematic analysis of S-start of zebra danio (*Danio rerio*) [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(5):519—526 (in Chinese))
- [42] Fulton C J, Bellwood D R. Wave-induced water motion and the functional implications for coral reef fish assemblages[J]. Limnology and Oceanography, 2005, 50(1):255—264.
- [43] Astudillo-Clavijo V, Arbour J H, López-Fernández H. Selection towards different adaptive optima drove the early diversification of locomotor phenotypes in the radiation of Neotropical geophagine cichlids[J]. BMC Evolutionary Biology, 2015, 15(1):1—13.
- [44] Haas T C, Heins D C, Blum M J. Predictors of body shape among populations of a stream fish (*Cyprinella venusta*, *Cypriniformes*: *Cyprinidae*) [J]. Biological Journal of the Linnean Society, 2015, 115(4):842—858.
- [45] Feilich K L. Correlated evolution of body and fin morphology in the cichlid fishes[J]. Evolution, 2016, 70(10):2247—2267.
- [46] Lucas K N, Thornycroft P J M, Gemmell B J, et al. Effects of non-uniform stiffness on the swimming performance of a passively-flexing, fish like foil model[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(5):056019.

Analysis of swimming dynamic characteristics of juvenile grass carp during routine turning

HUANG Huiling^{1,2}, HU Xiao^{1,2}, ZHANG Ben³, YANG Guodang⁴, LONG Zeyu^{1,2}, SHI Xiaotao^{1,2}

(1. Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 3. Survey and Design Institute of Shanghai, Shanghai 200050, China; 4. Huaneng Tibet Yarlungzangbo River Hydropower Development and Investment Co. Ltd, Lhasa 850000, Tibet, China)

Abstract: In order to study the formation of thrust and resistance of juveniles in the course of conventional turning, this paper took grass carp juveniles (*Ctenopharyngodon idella*) as the research object, and used PIV (Particle Image Velocimetry) to record the C-shaped bending and swing-back stage juveniles during the turning process. The fluid pressure around the fish body and the changing laws of pushing, resistance and lateral force formed by the positive and negative fluid pressures were analyzed. The results show that the juvenile grass carp can produce an average thrust of 118.05 μN during the entire turning process, of which 53.99% comes from the tail. While, the average resistance of the fish body reaches 99.16 μN , of which the resistance generated in the middle of the fish body accounts for 54.70%. In the C-shaped bending stage, the thrust generated by the negative fluid pressure distributed around the juvenile body accounts for 61.56%, which is the main source of thrust formation. At this time, the lateral force increases to provide the necessary centripetal force for the juvenile fish body to turn. After completing most of the turning movements, the juvenile grass carp accelerates; in the swing phase, the thrust generated by the positive pressure of the grass carp juvenile body is as high as 73.80%. At this time, the lateral force rapidly decreases to 0 and then rises to stop the fish. The body continues to rotate, and the juvenile fish slows down.

Keywords: PIV; turning; fluid pressure; thrust; resistance; lateral force