

基于多体运动数值模拟方法研究髋关节屈曲角度对水下海豚泳打腿的影响

左川¹, 李天赠², 孙杨¹, 张胜年¹, 刘宇¹

(1. 上海体育学院 运动科学学院, 运动健身科技省部共建教育部重点实验室, 上海 200438;

2. 佛山科学技术学院 工业设计与陶瓷艺术学院, 广东 佛山 528011)

摘要:目的 研究水下海豚泳打腿过程中运动员周围的流场特性、净流向力变化,以及伸展打腿结束时髋关节屈曲角度对水下海豚泳打腿的影响。**方法** 通过三维扫描得到游泳运动员的身体形态数据,对数据进行逆向重构得到游泳运动员模型,对运动员模型的各关节进行分离,将模型划分为各运动环节,通过控制各运动环节的运动模拟水下海豚泳打腿动作,并使用计算流体力学(computational fluid mechanics, CFD)软件包 ANSYS Fluent 作为求解器进行计算求解。**结果** 流场中速度梯度较大的区域,涡结构从运动员的身体表面脱落,且伸展打腿阶段和屈曲打腿阶段脱落的涡结构不同;推进力主要产生于伸展打腿阶段;伸展打腿结束时,当髋关节的屈曲角度由 20° 增加至 30°,运动员受到的阻力减小。**结论** 在一定程度上增加伸展打腿结束时的髋关节屈曲角度能够减小运动员进行水下海豚泳打腿时受到的阻力,增加游进速度。

关键词: 计算流体力学; 水下海豚泳打腿; 多体运动

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.04.003

Influence of Hip Joint Flexion Angle on the Submerged Dolphin Kick Stroke Based on Numerical Simulation of Multi-Body Motion

ZUO Chuan¹, LI Tianzeng², SUN Yang¹, ZHANG Shengnian¹, LIU Yu¹

(1. Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, School of Kinesology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. School of Industrial Design and Ceramic Art, Foshan University, Foshan 528001, Guangdong, China)

Abstract: Objective To explore characteristics of flow field around the athletes, change of net flow force, and influences of hip flexion angles at the end of extension kick on the submerged dolphin kick stroke. **Methods** The body shape data of a swimmer were obtained by three-dimensional (3D) scanning, and the data were reversely reconstructed to obtain the swimmer model. The joints of the swimmer model were separated, and each segment of the athlete was divided into independent rigid body, and simulation of the submerged dolphin kick stroke was realized by controlling movement of each independent rigid body. The computational fluid dynamics (CFD) software package ANSYS Fluent was used as the solver for calculation and solution. **Results** The vortex structures were shed off from the surface of the swimmer's body in the area with a large velocity gradient in flow

收稿日期:2021-05-21; 修回日期:2021-05-24

基金项目:上海科委地方院校能力建设项(19080503300),国家自然科学基金项目(11802061),广东省普通高校青年创新人才项目(2017KQNCX208)

通信作者:刘宇,教授,博士研究生导师, E-mail: yuliu@sus.edu.cn

field, and the shedding of vortex structures was different at the stage of extension kick and flexion kick. Propulsion was mainly generated during extension kick phase. At the end of extension kick, the drag decreased as the hip flexion angle increased from 20° to 30° . **Conclusions** To some extent, increasing flexion angle of the hip joint at the end of extension kick will reduce the drag force and increase the swimming speed in process of the submerged dolphin kick stroke.

Key words: computational fluid mechanics (CFD); submerged dolphin kick stroke; multi-body motion

竞技游泳包括由自由泳、仰泳、蛙泳和蝶泳4种泳姿组成的不同距离的比赛项目,每项比赛都由出发、途中游、转身和终点触壁4个技术环节组成。4种泳姿的运动员在出发和转身后都会使用水下海豚泳打腿技术。研究表明,水下海豚泳打腿表现对比赛成绩有一定的影响^[1-3]。为了获得更好的水下海豚泳打腿表现,科研人员已经进行了一系列研究。传统的生物力学研究主要使用高速摄像机对运动员的游泳画面进行视频捕捉,并对水下海豚泳打腿过程进行运动学分析。然而,由于游泳运动的特殊性,使用传统方法很难获得运动员游进过程中受到的力。随着流体力学理论、计算机工程以及数值模拟技术的发展,科研人员将计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟技术应用到游泳运动的研究中。有学者采用准稳态方法,研究不同速度下大幅度低频率打腿和小幅度高频率打腿对推进效率的影响;结果显示,大幅度低频率打腿的效率更高,并且打腿过程中腿部产生的推进力大于足部^[4-5]。Loebbecke等^[6]采用侵入边界法模拟男、女各1名奥运会级别游泳运动员的水下海豚泳打腿动作。结果显示,水下海豚泳打腿的推进力主要产生于伸展打腿阶段,伸展打腿过程中形成的涡对推进力有很大影响,且人体大部分的推进力来自足部。Cohen等^[7]使用光滑粒子流体动力学方法研究不同打腿频率和不同踝关节跖屈-背屈角度对水下海豚泳打腿的影响。该研究结果同样显示,伸展打腿阶段产生了最大的推进力,并且加快打腿频率能够增大游进速度,而在1个水下海豚泳打腿周期中,游进方向的平均净流向力对踝关节跖屈-背屈角度相对不敏感。Yamakawa等^[8]使用非结构化滑移网格有限体积法模拟1名男性游泳运动员的海豚泳打腿动作。结果表明,游进速度受膝关节最大屈曲角度的影响。我国李天赠及其研究团队在前期高逼真度游泳滑行数值模拟研究的基础

上^[9-12],提出了基于多体运动的游泳通用三维数值模拟方法,使用该方法计算得到的水下海豚泳打腿的净流向力变化趋势与Cohen等^[13]使用光滑粒子流体动力学方法得到的结果基本一致。

目前,学者们使用CFD模拟技术,进行了一系列关于打腿幅度、打腿频率、膝关节角度变化和踝关节跖屈-背屈对水下海豚泳打腿影响的研究。但是,关于髋关节屈伸角度对水下海豚泳打腿影响的研究鲜有报道。本文使用多体运动数值模拟方法,研究水下海豚泳打腿过程中运动员周围的流场特性、净流向力变化,以及髋关节屈曲角度对水下海豚泳打腿的影响。

1 研究方法

1.1 游泳运动员模型处理

选择1名大学生游泳运动员(年龄21岁,身高178 cm,体质量78 kg)作为扫描对象。使用人体专用3D扫描仪(ZBOT SCAN-1X)和对运动员身体形态进行扫描,并使用3D扫描数据处理软件Geomagic对扫描得到的运动员身体形态数据进行逆向重构,得到运动员计算机辅助设计(computer-aided design, CAD)模型。根据水下海豚泳打腿技术动作的特点,对运动员模型躯干中点以及踝、膝、髋、肩等运动关节进行修改,将运动员模型划分为足部、小腿、大腿、腰腹部、胸部、手臂等运动环节(见图1)。



图1 游泳运动员模型
Fig.1 Swimmer model

1.2 控制方程

水被假设为不可压缩黏性流体,流体流动的控制方程为不可压缩黏性流体 Navier-Stokes (N-S) 方

程和连续性方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; p 为压强; g_i 为重力加速度; u_i 和 u_j 为速度矢量的分量; ν 为运动黏性系数; $i, j = 1, 2, 3$ 为三维流动中 3 个互相垂直的方向。

湍流模型选择计算速度梯度较大的流场和强旋转流动时精度较高的 RNG $k-\varepsilon$ 模型,对控制方程进行封闭求解:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + G_{1\varepsilon} + C_{3\varepsilon} G_b - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_i 为 3 个坐标分量; k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; G_b 为由浮力决定的湍动能; G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能; μ_{eff} 为湍流黏度, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, μ 为水的黏度, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; $R_\varepsilon = C_\mu \rho (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2 / (1 + \beta \eta^3) / k$; $\eta = sk / \varepsilon$; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 a_k 和 a_ε 为经验常数; S_k 和 S_ε 为自定义源项; η_0 和 β 为常数。

考虑到水下海豚泳打腿过程中水面的变形,本文采用流体体积(volume of fluid, VOF)模型模拟自由液面。体积分数函数 F_q 为单元内第 q 相流体所占体积与该单元的总容积之比。 $F_q = 1$, 表示该单元内全部为第 q 相流体; $F_q = 0$, 表示该单元内不含有第 q 相流体; $0 < F_q < 1$, 表示该单元为交界面单元。本文中的自由液面问题只涉及空气与水两项,故 $q = 1, 2$ 。 F_q 方程满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial F_q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(F_q u_i) = 0 \quad (q = 1, 2) \\ F_1 + F_2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

为求解动态游泳问题,本文引入动网格技术对运动员各运动环节持续变化的过程进行计算。在动网格方法中,对于控制体 V 而言,可以用广义标量 ϕ 的积分形式的守恒方程来表示其边界条件的运动:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot d\mathbf{A} = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (4)$$

式中: \mathbf{u} 为流体的速度矢量; \mathbf{u}_g 为网格的移动速度; Γ 为扩散系数; S_ϕ 为关于的 ϕ 源项。

1.3 运动控制

本研究使用计算流体力学软件包 ANSYS Fluent 的用户自定义功能 (user defined functions, UDF), 通过控制足部、小腿、大腿、腰腹部、胸部、手臂等运动环节的运动, 实现对游泳运动员模型水下海豚泳打腿动作的控制。如图 2 所示, 游泳运动员模型的踝关节角度 (θ_1) 为足部与小腿间的角度, 膝关节角度 (θ_2) 为小腿与大腿间的角度, 髋关节角度 (θ_3) 为大腿与腰腹部间的角度, 躯干角度 (θ_4) 为腰腹部与胸部间的角度, 肩关节角度 1 (θ_5) 为胸部与肩关节间的角度, 肩关节角度 2 (θ_6) 为手臂与肩关节间的角度。

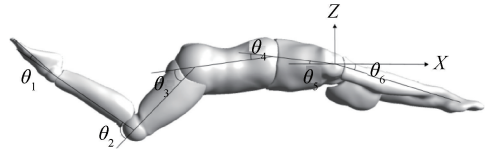


图 2 游泳运动员模型关节角度示意图

Fig.2 Schematic diagram of joint angles of the swimmer model

本研究中,运动员模型进行水下海豚泳打腿时各关节角度的变化使用 Cohen 等^[7]提供的运动学数据[见图 3(a)]。在水下海豚泳打腿周期中, $0 \sim 0.65 T$ 为水下海豚泳打腿的屈曲打腿阶段,即运动员脚尖达到最低点至膝关节达到最大屈曲的阶段; $0.65 \sim 1 T$ 为水下海豚泳打腿的伸展打腿阶段,即运动员膝关节达到最大屈曲至脚尖达到最低点的阶段^[6-7]。为比较髋关节屈曲角度对水下海豚泳打腿的影响,对运动员模型水下海豚泳打腿过程中髋关节屈曲角度的变化进行修改[见图 3(b)]。在运动模式 1 中,运动员模型各关节角度变化与 Cohen 等^[7]的研究相同。从运动模式 1 到运动模式 3,在伸展打腿结束时,运动员模型髋关节屈曲角度从 20° 增大至 30° ,其余各关节角度与运动模式 1 中相同(见图 4)。

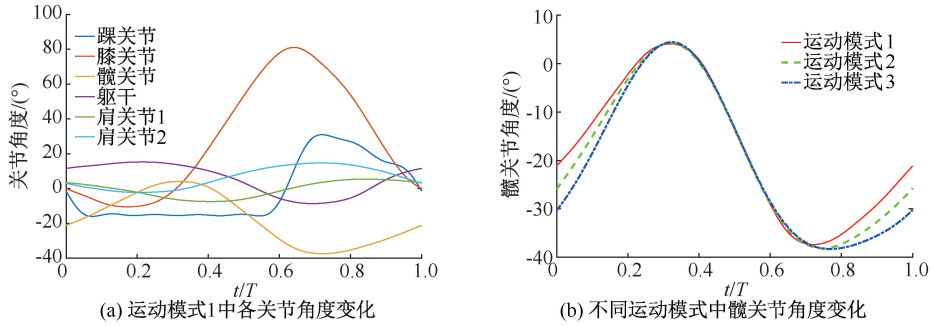


图3 关节角度变化曲线

Fig.3 Joint angle curves (a) Joint angle changes in motor pattern 1, (b) Hip joint angle changes in different motor patterns

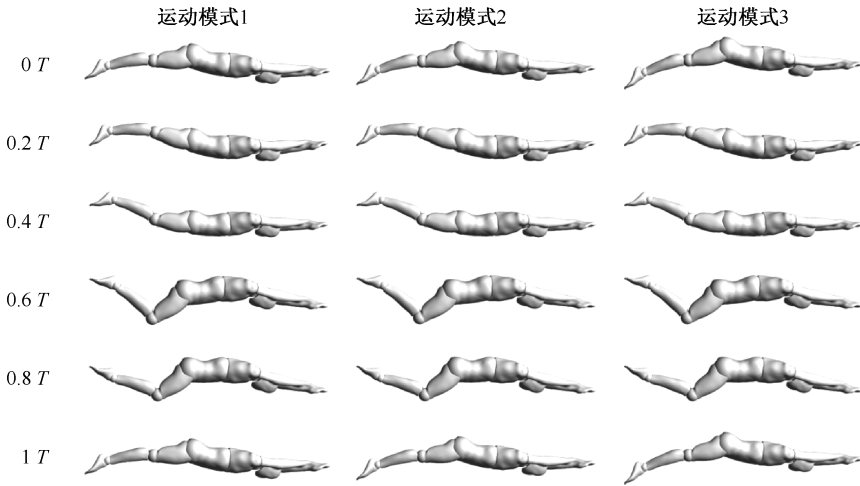


图4 水下海豚泳打腿动作图

Fig.4 Diagrams of the submerged dolphin kick stroke

1.4 计算域设置

通过设置数值水槽模拟运动员水下海豚泳打腿的运动状态。数值水槽左右对称,运动员模型位于水面下方 0.7 m 的水槽对称面处。计算域包括动态网格区域和静止网格区域。动态网格区域由四面体网格组成,位于运动员模型周围,长 2.55 m,宽 0.6 m,高 0.8 m。静止网格区域由结构化网格组成,位于动态网格区域外围,包括水槽区域和水槽上方的空气区域。水槽区域长 4 m,宽 1 m,高 1.4 m,空气区域位于水槽区域上方,长宽与水槽区域相同,高 0.5 m。为更好地模拟水面的变化情况,对水与空气交界面附近的网格进行加密处理。本研究中,计算域前端设置为速度入口,来流速度设置为 1.7 m/s,计算域上端和后端设置为压力出口,计算域下端和运动员模型表面设置为光滑壁面条件,计

算域两侧设置为对称边界条件(见图 5)。

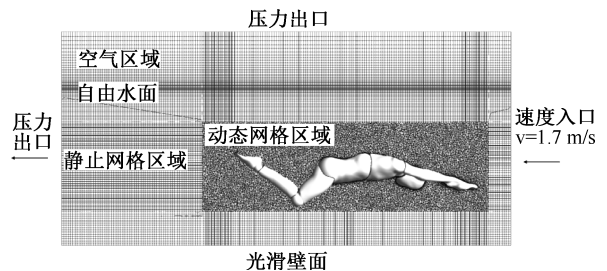


图5 计算域示意图

Fig.5 Schematic diagram of computational domain

1.5 计算求解方法

使用计算流体力学软件包 ANSYS Fluent 作为求解器进行计算求解。控制方程的离散使用有限体积法,使用适合处理非稳态问题的压力隐式算子分

裂 (pressure-implicit with splitting of operators, PISO) 算法进行压力速度耦合, 压力插值设置为二阶格式 (Second Order)。对流项的离散使用 2 阶迎风格式 (second order upwind) 格式, 而时间变化项使用 1 阶隐式 (first order implicit)。使用弹簧光顺法 (spring-based smoothing) 和局部重构法 (local remeshing) 控制网格更新。

2 结果

2.1 流场特性

在运动员进行水下海豚泳打腿过程中, 当水流经过运动员额头、臀部、足跟和做屈曲运动的膝关节等部位时速度增加, 而水流经过颈部、腰部和做屈曲运动的髌关节等部位时速度减慢 [见图 6(a)]。在屈曲打腿第 2 阶段 (0.4~0.6 T), 运动员的大腿后方逐渐形成了 1 个速度梯度较大的 1 个低速区域, 该低速区域位于臀部和膝关节附近的高速区域之间, 随着运动员的伸展打腿 (0.7~1 T), 该区域经过两侧大腿之间运动至膝关节下方, 并逐渐远离人体。

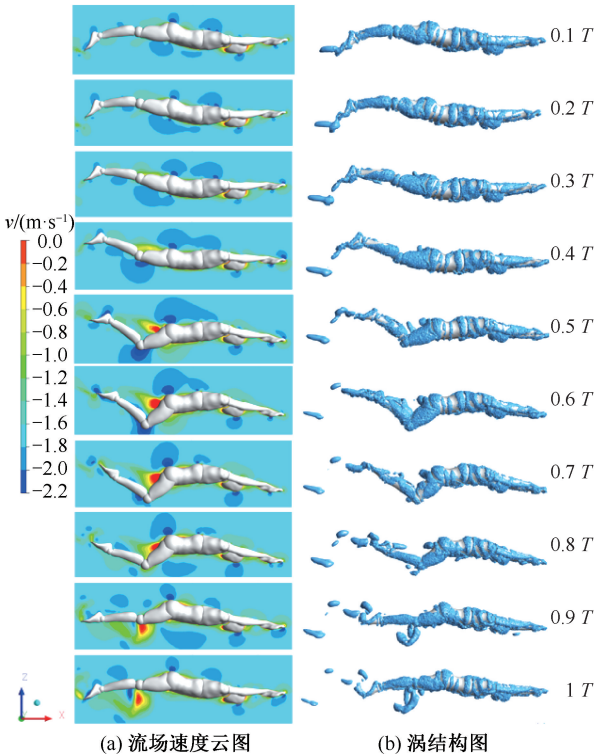


图 6 游泳运动员模型流场特性

Fig.6 Fluid field characteristics of the swimmer model

(a) Contours of the flow field velocity, (b) Diagrams of the vortex structure

在水下海豚泳打腿过程中, 运动员模型表面被涡结构环绕, 在运动员的头部、臀部和下肢, 涡结构较为密集, 而在躯干和上肢, 涡结构较为稀疏 [见图 6(b)]。在伸展打腿结束时, 大型的涡结构从运动员的膝关节和足部脱落, 并随着水流向后运动, 而在屈曲打腿过程中, 一系列小的涡结构从运动员足部脱落。

2.2 净流向力

在水下海豚泳打腿过程中, 上肢和躯干表面压力变化较小, 而下肢表面压力变化较大。在屈曲打腿第 1 阶段 (0~0.3 T), 运动员各环节运动幅度均较小, 表面压力变化较小。在屈曲打腿第 2 阶段 (0.3~0.65 T), 运动员的髌、膝关节屈曲, 踝关节跖屈, 大腿腹侧和足背压力减小, 大腿背侧、小腿背侧和足底压力增大。在伸展打腿第 1 阶段 (0.65~0.85 T), 运动员的髌、膝关节伸展, 踝关节背屈, 大腿腹侧、小腿腹侧和足背压力减小, 大腿背侧、小腿背侧和足底压力增大。在伸展打腿第 2 阶段 (0.85~1 T), 运动员的髌、膝关节继续伸展, 踝关节继续背屈, 大腿腹侧、小腿腹侧和足底压力减小, 大腿背侧、小腿背侧和足背压力增大 (见图 7)。

在整个水下海豚泳打腿周期中, 运动员足部、小腿和大腿受到净流向力变化幅度较大 [见图 8(a)], 而腰腹部、胸部和手臂受到的净流向力变化幅度较小 [见图 8(b)]。在屈曲打腿第 1 阶段 (0~0.3 T), 运动员身体各环节受到的净流向力均在 0 附近的小范围内波动。在屈曲打腿第 2 阶段 (0.3~0.65 T), 运动员足部、小腿和大腿受到净流向力主要为阻力, 在 0.53 T 左右, 运动员受到的阻力达到最大峰值。在伸展打腿第 1 阶段 (0.65~0.85 T), 运动员的足部、小腿和大腿受到净流向力主要为推进力。在 0.67 T 左右, 运动员足部、小腿和大腿受到的推进力均达到局部峰值, 运动员受到的推进力达到最大峰值。在 0.8 T 左右, 运动员大腿受到的推进力再次达到局部峰值, 运动员受到的推进力达到伸展打腿阶段的第 2 个峰值。在伸展打腿第 2 阶段 (0.85~1 T), 运动员足部和大腿受到的净流向力主要为阻力, 小腿受到的净流向力主要为推进力。在 0.9 T 左右, 运动员受到的阻力达到伸展打腿阶段的峰值。

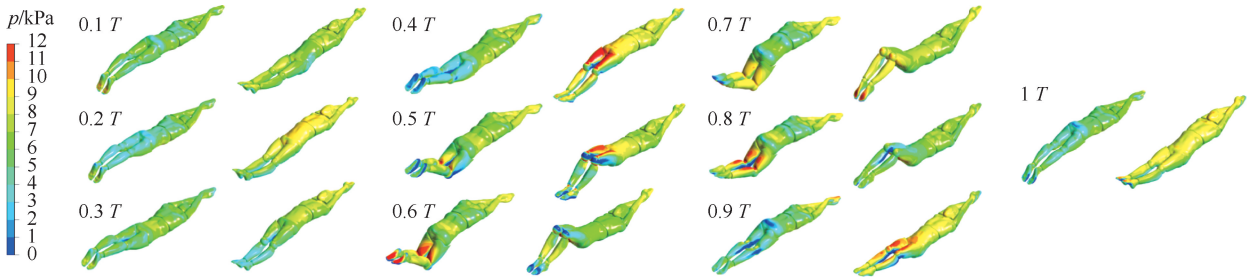


图7 游泳运动员模型表面压力图

Fig.7 Surface pressure contours of the swimmer model

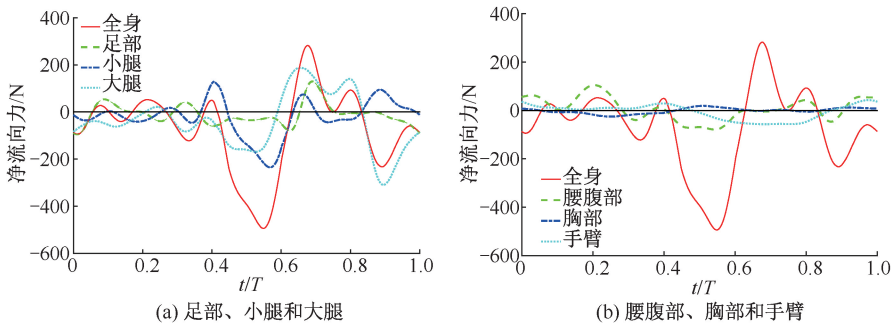


图8 运动模式1中运动员模型不同部位受到净流向力

Fig.8 Net streamwise force at different body parts of the swimmer model in motor pattern 1

(a) Feet, thighs and shanks, (b) Waist and abdomen, chest and arm

2.3 髋关节屈曲角度对净流向力的影响

屈曲打腿第1阶段的前期(0~0.2 T),净流向力为推进力,运动模式3中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的推进力均为各运动模式中最大;运动模式1中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的推进力均为各运动模式中最大;运动模式2中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的推进力均为各运动模式中最大;运动模式1中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的推进力均为各运动模式中最大。在0.3~0.6 T阶段,3种运动模式净流向力的区别较小。在伸展打腿第1阶段(0.65~0.85 T),净流向力为推进力,运动

模式3中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的推进力均为各运动模式中最大;运动模式1中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的推进力均为各运动模式中最大。在伸展打腿第2阶段(0.85~1.0 T),净流向力为阻力,运动模式3中,运动员小腿、足部及全身受到的阻力均为各运动模式中最大;运动模式1中,运动员小腿、足部及全身受到的阻力均为各运动模式中最大;运动模式2中,运动员小腿、足部及全身受到的阻力均为各运动模式中最大(见图9)。

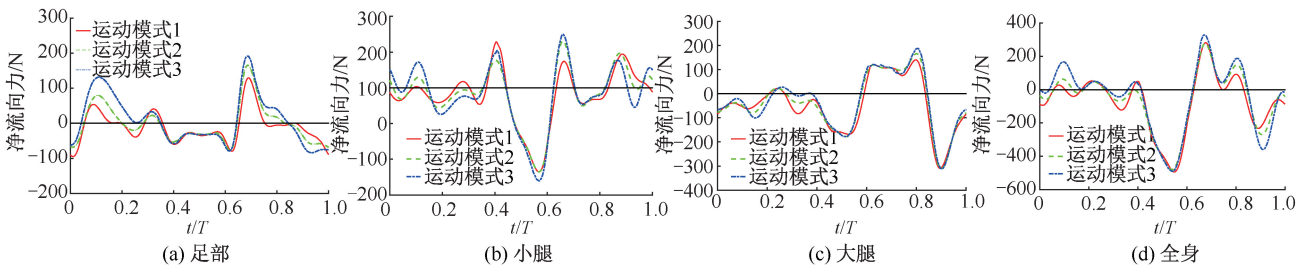


图9 不同运动模式中运动员模型受到的净流向力变化

Fig.9 Net streamwise force of the swimmer model under different motor patterns (a) Feet, (b) Shanks, (c) Thighs, (d) Whole body

在1个水下海豚泳打腿周期内,3种运动模式中,运动员模型小腿、大腿及全身受到的平均净流向力均为阻力,且大腿受到的阻力大于小腿受到的阻力。在运动模式1中,足部受到的净流向力为阻力,在运动模

式2、3中,足部受到的净流向力为推进力。运动模式1中,足部、大腿及全身受到的净流向力均为3种运动模式中最大;运动模式3中,足部、大腿及全身受到的净流向力均为3种运动模式中最大(见表1)。

表1 不同运动模式中足部、小腿、大腿及全身所收平均净流向力对比

Tab.1 Comparison of average net streamwise force of feet, shanks, thighs and whole body under different motor patterns 单位:N

运动模式	足部	小腿	大腿	全身
1	-10.38	-21.42	-40.78	-73.86
2	1.52	-17.44	-37.73	-62.19
3	10.73	-19.21	-30.81	-43.69

3 讨论

本文采用数值模拟方法,根据水下海豚泳打腿技术动作特点,将人体形态的变化转化为各运动环节的方位变化,从而解决因形体变化而引起的网格畸形问题,并在此基础上搭建数值模型进行计算。与光滑粒子流体动力学方法相比,使用本方法不仅能够模拟运动员进行水下海豚泳打腿时周围流场的特性,还能够模拟游动过程中运动员表面压力的变化和身体各运动环节的受力情况。

3.1 流场特性

在运动员进行水下海豚泳打腿时,身体附近的水流速度与运动员形态有关。当水流流经运动员模型表面的突起部位(如额头、臀部和足跟等部位)时,流速增加;当水流流经运动员模型表面的凹陷部位(颈部和腰部等部位)时,流速减慢。同时,身体附近的水流速度还与运动员的运动有关。在屈曲打腿第2阶段(0.4~0.6 T),运动员的髌、膝关节屈曲,相同时间内,水流流经运动员臀部和膝关节前侧的路径增长,流速增加,同时,大腿和小腿与水流相向运动,给水流1个与来流方向相反的冲量,大腿腹侧和小腿背侧的流速减慢,在运动员大腿后方形成了1个速度梯度较大的低速区域。在伸展打腿阶段(0.7~1 T),随着髌、膝关节的伸展,运动员的臀部和腿部周围流速逐渐接近来流速度,大腿后方的低速区域也随着水流向后向下运动至膝关节下方,并逐渐远离人体。对比流场速度云图和涡结构图还可以看出,运动员模型周围的涡量与速度梯度有关。在速度梯度大的部位(如头部、臀部和下肢),涡量较大;而在速度梯度小的部位(如躯干和上肢),涡量也较少。涡结构的脱落主要发生在运动幅度较大的下肢,且涡结构的运动与速度

梯度较大的区域一致^[6]。伸展打腿阶段和屈曲打腿阶段从足部脱落的涡结构不同,其原因可能是伸展打腿和屈曲打腿时足部的运动速度不同。在伸展打腿时,足部的运动速度较快,脱落的涡结构较大;而在屈曲打腿时,足部的运动速度较慢,脱落的涡结构较小。

3.2 净流向力

本研究中,运动员模型表面光滑,在水面下0.7 m深度游进,摩擦阻力和波浪阻力对净流向力的影响很小,运动员模型受到的阻力主要为形状阻力^[14-15]。形状阻力与游进方向的投影面积成正比。在屈曲打腿第1阶段(0~0.3 T),运动员身体各环节运动幅度较小,受到的净流向力均在0 N附近的小范围内波动。在屈曲打腿第2阶段(0.3~0.65 T),运动员髌、膝关节屈曲,踝关节跖屈,大腿、小腿和足部在游进方向的投影面积增大;同时,运动员大腿、小腿和足部与来流相向运动,下肢各环节前侧压力大于后侧,运动员受到的阻力逐渐增大,在0.53 T 左右,阻力达到最大。之后,髌、膝关节屈曲角度继续增大,运动员的下肢形成了一个上方凹陷、下方突起结构,各环节后侧流速逐渐减慢,前侧流速逐渐增大。根据伯努利原理,下肢各环节后侧压力逐渐大于前侧,运动员受到的净流向力由阻力变为推进力。在伸展打腿第1阶段(0.65~0.85 T),运动员髌、膝关节伸展,游进方向投影面积减小,大腿、小腿和足部对水施加1个向后的冲量,根据牛顿第3定律,水会给大腿、小腿和足部向前的反冲量,推动人体向前运动,下肢各运动环节后侧的压力大于前侧,运动员受到向前的推进力。在伸展打腿第2阶段(0.85~1 T),运动员髌、膝关节继续伸展,下肢上方凹陷,下方突起结构逐渐消失,大腿前侧流速逐渐减慢,后侧流速逐渐增大,前侧压力逐渐大于后侧;同时,游进方向投影面积增大,运动员受到的净流向力由推进力变为阻力。在整个水下海豚泳打腿过程中,推进力主要产生于伸展打腿阶段,但净流向力的变化非常复杂,受游进方向投影面积、各环节运动趋势、运动员身体形态等多种因素的影响。

3.3 髌关节屈曲角度对净流向力的影响

从运动模式1到运动模式3,在屈曲打腿阶段(0~0.3 T)和伸展打腿阶段(0.65~1 T),运动员模

型髋关节屈曲的角度逐渐增大,膝、踝关节的运动保持不变。髋关节角度的变化不仅会改变大腿的运动,小腿和足部的运动也会随之改变。屈曲打腿第1阶段的前期(0~0.2 T),运动员的髋关节伸展,足部、小腿、大腿从脚尖处于最低点的姿势开始向后向上运动至接近水平位置,水给人水平方向向前的冲量;同时,游进方向投影面积减小,净流向力为推进力。在这一时期,运动模式3中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的净流向力均为各运动模式中最大;运动模式1中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的净流向力均为各运动模式中最小。造成这种现象的原因可能是运动模式3中,运动员足部、小腿和大腿均从3种模式中最前最低的位置开始向后向上运动,在相同时间内,运动幅度最大,对水在水平方向的冲量最大,下肢投影面积的减小量最大;而在运动模式1中,运动员足部、小腿和大腿均从3种模式中最后最高的位置开始运动,在相同时间内,运动幅度最小,对水在水平方向的冲量最小,下肢投影面积的减小量最小。在0.3~0.6 T阶段,3种运动模式中髋关节角度变化几乎一致;但在0.3~0.43 T阶段,可以观察到,运动员模型大腿、小腿、足部及全身受到的净流向力存在一些区别。该结果说明周围的流场在髋关节屈曲角度不同时(0~0.3 T)产生了不同的变化,进而影响了之后(0.3~0.43 T)髋关节屈曲角度相同时运动员模型受到的力。在伸展打腿第1阶段(0.65~0.85 T),运动员髋、膝关节伸展,大腿、小腿和足部给水向后的冲量,水给人向前的反冲量;同时,游进方向投影面积减小,运动员受到向前的推进力。从运动模式1到运动模式3,髋关节屈曲角度逐渐增大,运动模式3中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的推进力均为各运动模式中最大;运动模式1中,运动员大腿、小腿、足部及全身受到的推进力均为各运动模式中最小。上述结果说明,在伸展打腿第1阶段,较大的髋关节屈曲角度有利于产生较大的推进力。在伸展打腿第2阶段(0.85~1 T),运动员膝关节继续伸展,小腿和足部向前向下打腿,受到水向后向上的冲量,同时游进方向投影面积增大,受到的净流向力为阻力。在这一阶段,运动模式3中,运动员小腿、足部及全身受到的阻力力均为各运动模式中最大;运动模式1中,运动员小腿、足部及全身受到

的阻力均为各运动模式中最小。造成这种现象的原因可能是运动模式3中,运动员足部和小腿向前向下运动至3种模式中最前最低的位置,在相同时间内,运动幅度最大,对水在水平方向的冲量最大,下肢投影面积的增大量最大;而在运动模式1中,运动员足部和小腿向前向下运动至3种模式中最后最高的位置,在相同时间内,运动幅度最小,对水在水平方向的冲量最小,下肢投影面积的减小量最小。

在1个完整的水下海豚泳打腿周期内,3种运动模式中,运动员模型全身受到的平均净流向力均为阻力,说明该体形运动员使用这3种运动模式均无法达到1.7 m/s游进速度。在运动模式3中,运动员受到的阻力最小;在运动模式1中,运动员受到的阻力最大,说明在伸展打腿结束时,髋关节的屈曲角度由20°增加至30°,能够增加运动员的游进速度。在整个水下海豚泳打腿周期内,仅有运动模式2、3中足部的平均净流向力为正,说明水下海豚泳打腿主要的推进力来自足部,这与Loebbecke等^[6]的研究结果一致。

4 结论

在水下海豚泳打腿的过程中,流场中速度梯度较大的区域,涡结构从运动员的身体表面脱落。涡结构的脱落主要发生在运动幅度较大的下肢,且伸展打腿阶段和屈曲打腿阶段脱落的涡结构不同。对于本研究所采用的水下海豚泳打腿动作,推进力主要产生于伸展打腿阶段,且主要来自足部。伸展打腿结束时,当髋关节的屈曲角度由20°增加至30°,运动员受到的阻力减小,游进速度增加。

参考文献:

- [1] GUIMARAES ACS, HAY JG. A mechanical analysis of the grab starting technique in swimming [J]. *Int J Sport Biomech*, 1985, DOI: 10.1123/IJSB.1.1.25.
- [2] VEIGA S, MALLO J, NAVANDAR A, et al. Effects of different swimming race constraints on turning movements [J]. *Hum Mov*, 2014, 36(6): 217-226.
- [3] MASON B, COSSOR J. What can we learn from competition analysis at the 1999 Pan Pacific Swimming Championships? [C]// *Proceedings of XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports*. USA: [s. n.], 2000.

- [4] LYTTLE A, KEYS M. The use of computational fluids dynamics to optimise underwater kicking performance [C]//Proceedings of ISBS 2004. Ottawa: [s.n.], 2004.
- [5] LYTTLE A, KEYS M. The application of computational fluid dynamics for technique prescription in underwater kicking [J]. Portuguese J Sport Sci, 2006, 6(2): 233-235.
- [6] LOEBBECKE AV, MITTAL R, MARK R, *et al.* A computational method for analysis of underwater dolphin kick hydrodynamics in human swimming [J]. Sports Biomech, 2009, 8(1): 60-77.
- [7] COHEN RCZ, CLEARY PW, MASON BR. Simulations of dolphin kick swimming using smoothed particle hydrodynamics [J]. Hum Mov Sci, 2011, 31(3): 604-619.
- [8] YAMAKAWA M, MIZUNO N, ASAO S, *et al.* Optimization of knee joint maximum angle on dolphin kick [J]. Phys Fluids, 2020, 32(6): 067105.
- [9] LI TZ, ZHAN JM. Hydrodynamic body shape analysis and their impact on swimming performance [J]. Acta Bioeng Biomech, 2015, 17(4): 3-11.
- [10] LI TZ, WAI O, GONG YJ, *et al.* Numerical and experimental investigation of a six DOF scaled model of a swimmer posed in streamlined posture [J]. Comput Fluids, 2017, 149: 1-11.
- [11] LI TZ, CAI WH, ZHAN JM, *et al.* Numerical investigation of swimmer's gliding stage with 6-DOF movement [J]. PLoS One, 2017, 12(1): e0170894.
- [12] ZHAN JM, LI TZ, CHEN XB, *et al.* Hydrodynamic analysis of human swimming based on VOF method [J]. Comput Methods Biomech Biomed Eng, 2017, 20(5-8): 645-652.
- [13] 李天赠, 蔡文豪, 詹杰民. 基于刚体运动的游泳运动三维数值模拟研究[C]//中国力学大会-2017暨庆祝中国力学学会成立60周年大会论文集. 北京: 中国力学学会, 2017.
- [14] POLIDORI G, TAIAR R, FOHANNO S, *et al.* Skin-friction drag analysis from the forced convection modeling in simplified underwater swimming [J]. J Biomech, 2006, 39(13): 2535-2541.
- [15] VENNEL R, PEASE D, WILSON B. Wave drag on human swimmers [J]. J Biomech, 2006, 39(4): 664-671.