两种手形对游泳推进效率影响的数值模拟

康宏琳 袁 武 高瑞泽 阎 超

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对采用何种手形游泳能产生较高的推进效率,运用计算流体力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)方法,建立了国内某女运动员手掌和前臂在五指并拢和五指分开两种手形的三维非结构网格模型;计算了90°攻角划水时两种不同手形的手掌和前臂在不同来流速度下的推进阻力、推进升力及其系数值,依据计算结果对手周围的流场进行了分析,研究了不同手形对游泳推进效率的影响. 结果表明压差阻力是推进阻力的主要组成部分,在90°攻角划水时五指并拢具有更高推进效率.

关 键 词: 计算流体力学; 游泳; 手形; 推进力

中图分类号: G 861.114.6

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0481-03

Numerical simulation of influence of two different hand-figures on swim propulsive efficiency

Kang Honglin Yuan Wu Gao Ruize Yan Chao

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to find which hand-figures could provide higher propulsive efficiency for swimming, two different 3D unstructured grid models of a native woman swimmer's hand and forearm were generated based on two hand-figures-fingers splaying and fingers holding together. The numerical technique of computational fluid dynamics (CFD) was applied to calculate the steady flow around the swimmer's hand and forearm in two different hand-figures at various speeds when angle of attack was 90°. The drags, lifts and corresponding coefficients were computed for the hand and forearm, and the flow fields around the hand and forearm were analyzed based on the calculated data, which showed the influence of hand-figures on swimming propulsive efficiency. The results show that the forces caused by pressure difference are the major part of the propulsive forces, swimming with fingers holding together provides higher propulsive efficiency than swimming with fingers splaying when the angle of attack is 90°.

Key words: computational fluid dynamics; swim; hand-figure; propulsive force

现代游泳运动竞争十分激烈,胜负就在百分之一秒之间,而科学的训练方法对提高运动成绩起着重要作用. 游泳流体力学是游泳运动的科学研究与训练的理论基础,但至今国内外对其研究甚少,且多以实验为研究手段[1~4]. 实践证明游泳实验费用高,且由于模型支架干扰或实验方法限制而引进的附加阻力和波浪阻力等,降低了实验精度. 而计算流体力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)在此复杂流动的研究中显示出其特有的优越性. CFD 在航空航天、水利水电、化工机械等各个领域都有着广泛的应用,但应用 CFD 研究游泳问题在国外 90 年代末期才起步[5,6],在国内,文献[7]通过将手模型简化为一圆盘和 5 根圆柱的组合体对手掌划水进行了数值模拟. 为了更准确地模拟手形对游泳推进效率的影响,针对游泳划水时手指张开与否的分歧,本文建立了国

收稿日期: 2005-01-25

基金项目: 国家体育总局奥运会攻关课题资助项目(委 03-02)

作者简介: 康宏琳(1979-), 女, 江西新余人, 博士生, klgiant@163.com.

内某著名女游泳运动员手掌和前臂在手指张开和并拢时的三维非结构网格模型,在此基础上分别模拟了在不同游速下,手指张开和并拢2种手形所产生的分离流动结构、涡系演化及水对手所产生的推进力,比较了划水过程中不同手形对推进力的影响,以期为运动员采取何种手形划水提供指导.

1 网格生成

人的手掌几何外形非常复杂,建立一个精确反映手掌细致结构的模型十分困难. 本文针对国内某著名女运动员手掌和前臂,建立能够反映手指各指节、手心、手背和前臂等细致结构的五指并拢和张开手模型,生成了五指并拢和五指分开2种手形下的手掌非结构网格(如图1、图2).

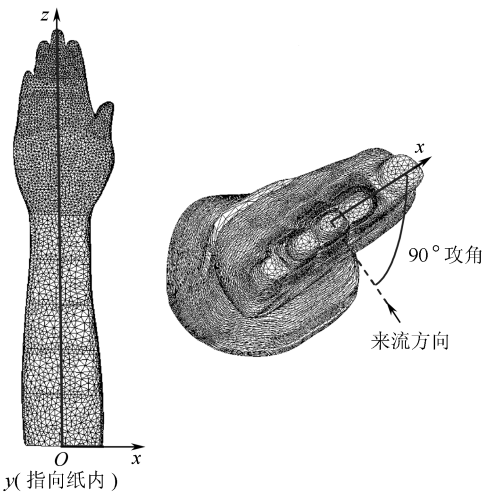

图1 五指并拢手网格

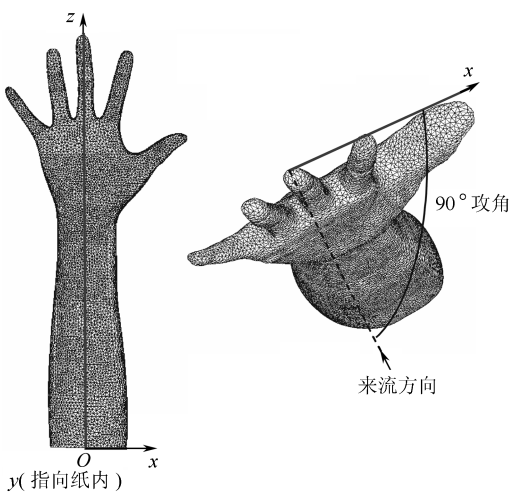

图2 五指张开手网格

坐标原点设在手肘中心处,手肘切面处于 x-y 平面上,z 轴定义为原点与中指顶点的连线方向,y 轴指向纸内,x 轴定义为食指、中指和无名指顶点的连线方向. 除拇指外,其余四指轴线均处于与 x-z 平行的平面上,x 轴与来流方向的夹角称之为攻角. 五指并拢和张开手形的空间网格数目分别为146 245和206 946.

2 控制方程和计算方法

本文旨在比较不同手形对推进力的影响,只考虑恒定流动条件,控制方程为定常不可压缩N-S方程,采用标准 k-ε 湍流模型,空间格式采用二阶迎风格式. 在计算中,来流方向为 y 轴矢量方向,即来流攻角为90°,后掠角为0°. 水温设为25℃,水的粘度为0.001 003 kg/ms,密度为998.2 kg/m^3,均保持常值. 在边界条件的处理上:物面边界条件满足无滑移条件;应用速度进口边界条件定义在流动进口处的流动速度及相关的其他标量型流动变量;手肘切面采用对称边界条件,这种近似处理有效地避免了边缘效应,使手肘切面无流体经过,符合真实物理现象.

划水过程中,手掌和前臂主要受到人体划水的力、自身重力以及水反作用于手的推进阻力和升力. 需要注意的是这里的推进阻力不是一般意义上的游泳阻力,而是水由于受到手的冲量而反作用于手的反冲力减去所有流体意义上的游泳阻力后的净力值[8];推进升力则是垂直于来流方向上力的投影. 本文中推进阻力方向为 y 轴方向,推进升力方向为 x 轴负方向. 在不同手形下推进阻力和升力有何不同是本文计算的目的所在,应用有限体积法离散求解上述控制方程,得到推进阻力 D 和推进升力 L. 阻力系数 C_d 和升力系数 C_l 分别由下式计算:

$$C_d = \frac{D}{\rho V^2 S/2} \qquad C_l = \frac{L}{\rho V^2 S/2} \tag{1}$$

其中 ρ 为水密度;V 为来流流速;S 为手掌和前臂在 x-z 平面上的投影面积.

3 计算结果及分析

为了模拟在不同流速下,手所产生的分离流动结构、涡系演化及水对运动员所产生的推进力,同时考虑到运动员的游进速度,本文计算了2种手形分别在来流速度 V(m/s)为0.5,1.0,1.5,2.0,2.5和3.0时的12个状态.

由于本文研究的是手对水攻角为90°时的升阻力性质,此时水流方向与人的游进方向一致,因此 L 在人体前进方向上不产生分量,推进力完全由 D 构成;又由图3、图4可知,L 相对 D 较小,在数值上相差一个数量级,因此在本文的研究中可以不考虑 L 的影响. 为分析方便,以下只讨论 D.

对于定常的低速绕流问题,如不考虑升力引起的诱导阻力,则 D 由压差阻力 D_1 和粘性摩擦

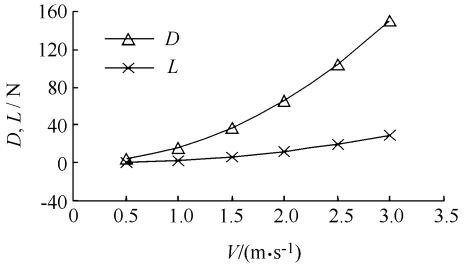

图 3　五指并拢模型 D 和 L 在不同 V 下的比较

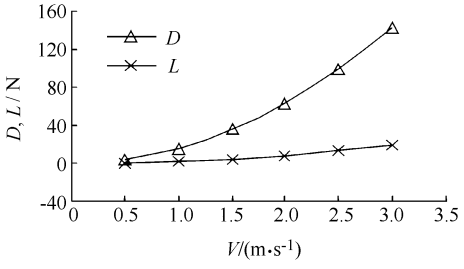

图 4　五指张开模型 D 和 L 在不同 V 下的比较

阻力 D_2 两部分组成. 由表 1、表 2 可以明显看出,在不同流速下,两种手形所产生的 D_2 均只占了很小一部分,因此 D 主要来源于 D_1.

表 1　五指并拢时 D_1 和 D_2 之比较　%

阻力比	$V/(m\cdot s^{-1})$					
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
D_1/D	97.93	98.10	98.19	98.24	98.29	98.32
D_2/D	2.07	1.90	1.81	1.76	1.71	1.68

表 2　五指张开时 D_1 和 D_2 之比较　%

阻力比	$V/(m\cdot s^{-1})$					
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
D_1/D	97.13	97.37	97.49	97.57	97.63	97.68
D_2/D	2.87	2.63	2.51	2.43	2.37	2.32

图 5 为五指并拢手形在 $V=2.0$ m/s 时,$z=0.29$ m处 A-A 截面的局部放大流线图. 由图可知,引起压差阻力的主要原因是:手划水过程中,水从手心面绕过手掌和前臂侧缘向手背面流动时,由于存在较大的逆压梯度,使依附在手表面流动的水发生分离,在手两侧附近各产生一个旋转方向相反的涡. 涡的产生致使手背面压强低于手心面压强,由此产生压差阻力. 随着 V 的增加,涡的发展很快,从而使手背面负压增加,压差阻力增大.

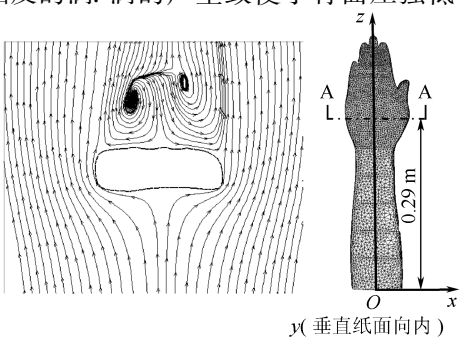

图 5　五指并拢 $V=2.0$ m/s 时,$z=0.29$ m 处 A-A 截面局部放大流线图

本文研究的主要目的是通过计算 2 种手形在不同来流速度下推进力的大小,比较得出何种手形在划水过程中能获得更高的推进力,即划水效率更高. 由图 3、图 4 可知,随着流速 V 的增加,两种手形在 90°攻角划水过程中获得的 D 都是增加的,且增加的趋势和幅度都比较接近. 在快速划水时,手指并拢相对手指张开获得的推进力要略高一些. 图 6 给出了不同流速 V 下 C_d 的比较,可见 2 种手形的 C_d 随 V 增加整体趋势都是下降的,这是因为虽然 D 增加了,由式(1)可知,C_d 与 D 的一次方成正比关系,而与 V 的二次方成反比关系,所以 C_d 随 V 增加而下降是合理的;手指并拢时的 C_d 较之手指张开时更大,由此可知,在 90°攻角划水时,五指并拢手形具有较高的推进效率.

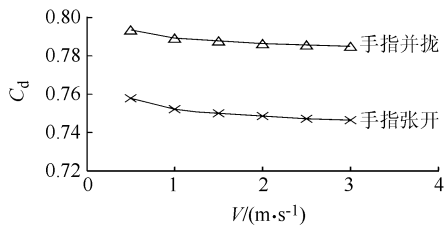

图 6　2 种手形 C_d-V 关系曲线

2 种手形划水时所获得的 D 之所以会呈现这样的差异,由上述分析可知引起压差阻力 D_1 的主要原因是手背面水流动发生分离,形成了旋涡区. 涡量是产生于物体的表面并扩散到流场中去的,所以受物体形状的影响较大. 具体就是手指开合直接影响压差阻力,最终导致 D 的差异.

4　结　论

本文运用 CFD 方法,建立了能够反映手掌和前臂细致结构的网格模型,对五指并拢和张开 2 种手形周围的流场进行了数值模拟,计算出 90°攻角划水时 2 种手形在不同来流速度下的 D,L 及 C_d. 研究结果表明:90°攻角划水时,五指并拢具有较高的推进效率. 因此运动员在其划水过程中,当手掌对水流攻角处于 90°时,应将五指并拢以提高划水效率. 必须指出的是,手指并拢有较高效率的结论并不一定适用于其它攻角条件. 这是因为:

①在其它攻角时,以上讨论的2种手形手背面

(下转第 498 页)