

# 基于CFD的游泳比赛粘性阻力分析

张智虎, 郑明刚, 曲 诚

山东建筑大学, 山东 济南

收稿日期: 2022年3月28日; 录用日期: 2022年5月16日; 发布日期: 2022年5月23日

## 摘 要

竞赛的核心精神是对抗与公平, 但显然从流体力学的角度来看, 游泳比赛本身就存在着不公平性。鉴于此, 利用Solidworks软件建立三维简化模型, 并应用Autodesk CFD软件对游泳比赛各泳道的流场及粘性阻力进行分析。且提出了在游泳池壁附近加装类传动带装置, 可有效减小各泳道粘性阻力的差值。

## 关键词

流体力学, 粘性阻力, CFD, 游泳比赛

# The Analysis of Adhesive Resistance in Swimming Competition Based on CFD

Zhihu Zhang, Minggang Zheng, Cheng Qu

Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 16<sup>th</sup>, 2022; published: May 23<sup>rd</sup>, 2022

## Abstract

The core spirit of competition is confrontation and fairness. However, from the perspective of fluid mechanics, it's obvious that swimming contest itself is unfair. In consideration of this situation, a simplified three-dimensional model is established by using Solidworks software, and the flow field and viscous resistance of swimming lanes are analyzed by using Autodesk CFD software. It is proposed that the difference of viscous resistance of swimming lanes can be effectively reduced by installing a belt-like device near the wall of swimming pool.

## Keywords

Fluid Mechanics, Adhesive Resistance, CFD, Swimming Contest



## 1. 引言

流体的粘性在体育竞技比赛尤其是游泳比赛中具有显著的影响,张晓侠[1]综述了运用 CFD 模型建立运动员在游泳时的模型流体对运动员的作用力,肯定了 CFD 仿真技术能对游泳运动的技术指导及相关的流体科学研究进行了很好的解释,避免了高成本和复杂过程的试验; Gardano 和 Dabnichki [2]在模拟自由泳手部划水时的动作,通过比较肘部与上臂不同夹角的阻力系数,发现肘部与上臂夹角为  $160^\circ$  时,阻力最大; Zaidi [3]等人,利用 CATIA 软件建立二维测试图,采用 GAMBIT 划分三角非结构泳池结构,分析游泳时身体各处涡流的分布情况,发现表面剪切阻力随着人体与水流相对速度的增大而增大,人体表面几何复杂位置的剪切压力较其他部位更大; Marinho [4]等人利用 FLUENT 软件模拟稳流划水运动中运动员手臂不同位置模型分析了行进阻力系数变化,发现当手臂与运动员身体更为贴近时,行进阻力更小,游泳的速度越快; Novais [5]等人为分析人体在不同速度对滑行特性的影响,通过利用 CFD 模型仿真运动员在 3 种行进速度(1.5 m/s, 2.0 m/s 和 2.5 m/s)、水深为 0 m 时的阻力情况,得出与水面正面接触越小,其形阻与摩阻越小的结论,另外,通过将运动员的运动深度放到水下,在做比较发现在水深 0.25 m 时阻力及阻力系数达到最大,在水深超过 0.25 m 后,阻力及阻力系数随水深逐渐下降,并得到 0.75 m 是综合考虑运动员的推进力和体力得到的综合结果;为研究多个运动员游泳时的水流特性,Sliva [6]利用二维 CFD 模型,通过将运动员设置在不同间隔距离的情况下,对运动员周身的阻力系数做出比较,发现在两人间距 0.50~6.00 m 时,领先运动员的阻力随水流速度的增大而减小,而落后的运动员身边的阻力系数约为前者的 56%,而当两人相距 6.45~8.90 m,水流对两人的阻力系数不会受到干扰;另外 Hanna [7]为了获取更先进的游泳装备,同样可以采用 CFD 模型对身体的仿真来评价不同泳衣的材质和特性,减少了研发成本和研发时间。上述游泳运动的 CFD 研究,对体育运动中流体的研究起到了推进作用。

我们可以将这种方式运用到游泳池中,通过运用 CFD 仿真游泳赛道,分析仿真结果,得到更公平公正的赛道,或者在现有的赛道上得到更有利的游泳策略,为游泳比赛取得理论性的优势。

## 2. 流体粘性在游泳比赛上的理论分析

在游泳比赛的预选赛中,成绩拔尖的几名选手将会在决赛中分配在中央泳道,而成绩不太好的则会被分配到游泳池两侧靠近游泳池壁的泳道,这样做显然是有原因的。我们可以通过有限元的方法分析各个游泳者附近的水流速,并想办法改进游泳池的结构,使比赛更具公平性,下面我们首先简化物理模型,然后通过理论分析粗略计算粘性阻力。

### 2.1. 游泳者所受粘性阻力的前提假设

为了利用数学的方式来解决这个问题,我首先假设一些必须条件。

假设一,流体的各个物理量满足连续介质模型。

假设二,室温  $25^\circ$ ,水的动力粘度  $\mu = 0.894 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

假设三,游泳者的游动速度较低,且由于  $\text{Re} = \rho v l / \mu$ ,从而使得雷诺数  $\text{Re} < 2000$ ,可判断流体为层流。

假设四,共有 7 个泳道,且每个人在相同的游泳环境下游泳速度是相同的,均假设为  $v$ 。

假设五,泳道的宽度为  $2y$ 。

假设六, 游泳者的游泳方式一样, 即与侧身水流的接触面积一样, 均为  $A$ 。

假设七, 由于隔离带的水深方向的长度较小, 因而其对游泳者的影响较小。

## 2.2. 在中间的游泳者的粘性阻力分析

由假设可知, 在游泳者游动过程中, 由于隔离带在水深方向的尺寸不大, 因而其对流体的传递流速的影响不大, 可忽略隔离带的影响, 于是游泳者附近的流体在粘性的作用下存在与游泳者游动方向相同的流速方向, 即水流的向前速度在泳道宽度方向上是等梯度分布的, 且由于水的动力粘度较大, 因而可粗略地假设: 在隔离带附近的流体流速为  $\delta V$ ,  $\delta V > 0$ , 由于速度是等梯度分布的, 于是隔离带上水流与游泳者侧身的水流的速度梯度  $\frac{dv_x}{dy} = \frac{(v - \delta v)}{y}$ ;

因而游泳者与左隔离带水流的粘性阻力为:  $F = \frac{A\mu(v - \delta v)}{y}$ ;

因而左右两隔离带对中央游泳者所产生的粘性阻力为:

游泳比赛粘性阻力  $F_1 = \frac{2A\mu(v - \delta v)}{y}$ 。

## 2.3. 在两侧泳道的游泳者受到的粘性阻力分析

由假设一可知, 在两侧靠近游泳池壁的水的流速  $V_1 = 0$ , 游泳者与左侧隔离带间的流体的粘性阻力易知为:

$$F = \frac{A\mu(v - \delta v)}{y};$$

游泳者与右侧游泳池壁间的水流的速度梯度为:

$$\frac{dv_x}{dy} = v/y;$$

因而游泳者与右侧流体流层间的粘性阻力为:  $F_{11} = \frac{A\mu v}{y}$ ;

因而左右水流对两侧游泳者所产生的粘性阻力为:

$$F_2 = \frac{2A\mu v}{y} - \frac{\delta v}{y};$$

所以综合分析可知, 在上述假设成立的情况下, 即隔离带对水流的减速作用不明显时, 显然中央游泳者所受到的粘性阻力近似等于两侧游泳者所受粘性阻力, 但仍稍微小, 即:

$$F_1 = \frac{2A\mu(v - \delta v)}{y} < \frac{2A\mu v}{y} - \frac{A\mu\delta v}{y} = F_2。$$

因而游泳比赛的不公平性得以体现。

## 3. 仿真模拟分析

### 3.1. 三维模型

为了进行实验分析, 首先简化数学模型。因此在上述理论分析的建设的的前提下, 为了精确计算粘性阻力, 应对某些模糊值量化。模型假设: 为了凸显粘性阻力, 有两种方法。一是增大粘性阻力, 二是粘性阻力与其他阻力(手拍击水面的反力等)共同消耗水流的动能。因此可以减少其他阻力, 以使粘性阻力所

占比例增大, 从而使得实验结果明显。于是游泳者在游泳池内潜泳, 且假设其游泳面积为一圆形, 半径为  $r = 0.2 \text{ m}$ , 并且增大游动速度。为了便于 Autodesk CFD 模拟计算, 可利用直径为  $0.4 \text{ m}$  的水泵在游泳池一端提供较大流速的水流, 通过观察游泳池内流体分布, 计算粘性阻力。并判断不同泳道的粘性阻力相对大小。量值假设: 由上假设游泳者两侧与水流接触面积为半圆柱面, 所以  $A = \pi \times r \times h = 1.131 \text{ m}^2$  (人身高可设为  $1.8 \text{ m}$ , 即  $h = 1.8$ ), 游泳者假设圆心距离水面为  $0.45 \text{ m}$ , 水深为  $2 \text{ m}$ , 泳道宽度为  $2 \text{ m}$ 。共有七个泳道, 即需七个水泵提供动能。由水泵及池壁组成的泳池网格化三维模型如下图 1~4 所示。

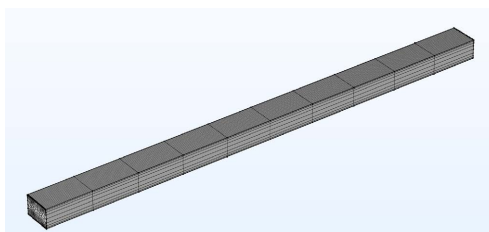


图 1. 网格数为 239,090 的三维模型  
Figure 1. 3D model with 239,090 grids

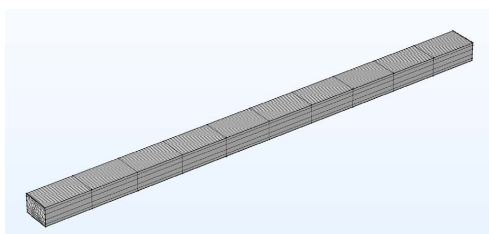


Figure 2. 3D model with 187,534 grids  
图 2. 网格数为 187,534 的三维模型

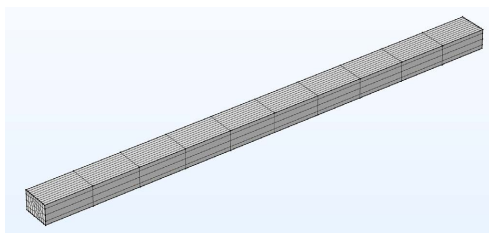


Figure 3. 3D model with 152,236 grids  
图 3. 网格数为 152,236 的三维模型

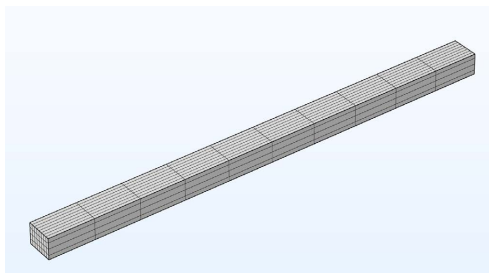


Figure 4. 3D model with 136,260 grids  
图 4. 网格数为 136,260 的三维模型

如图 5 不同网格数量的粘性阻尼对比图所示, 将上述 4 种方案进行计算泳池粘性阻尼的仿真中可以看出, 后 2 种方案的结果相差是可以接受的, 而前两种方案的结果要低得多。为了简化研究过程, 在保证精度的前提下尽可能缩短研究时间, 选择了第三种方案作为模型网格划分的依据, 其他泳道在网格划分阶段也采用了相同的方案。

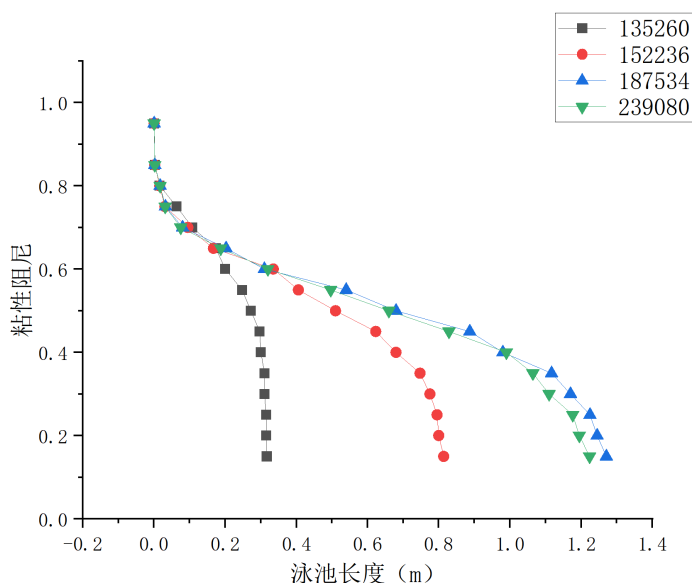


Figure 5. Comparison of viscous damping with different mesh numbers  
图 5. 不同网格数量的粘性阻尼对比图

### 3.2. CFD 模拟

进入 Autodesk CFD, 并导入 Solidworks 模型。且设置流体为水, 温度为常温, 水泵的流量为  $0.65 \text{ m}^3/\text{min}$ , 转速为  $2000 \text{ r/min}$ 。然后自动网格划分, 经过求解, 得出以下分析和计算结果。

为了使立体的结果, 平面化, 即建立如下平面, 过各水泵中心线, 且与池底相垂直的各平面依照与左池壁的距离分别设置为 A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8 平面, 过水泵中心线, 且与池底平面相平行的平面, 设为 B 平面, 与 A 平面和 B 平面垂直, 且距离泵芯距离  $50 \text{ cm}$  的平面设置为 C1 平面, 同时距离为  $100 \text{ cm}$ ,  $150 \text{ cm}$ ,  $200 \text{ cm}$ ,  $250 \text{ cm}$ ,  $300 \text{ cm}$  的平面, 依次设置为 C2, C3, C4, C5, C6 平面。

B 平面流体流速如下图 6 所示, 中间位置的流速比两边的流速较大。

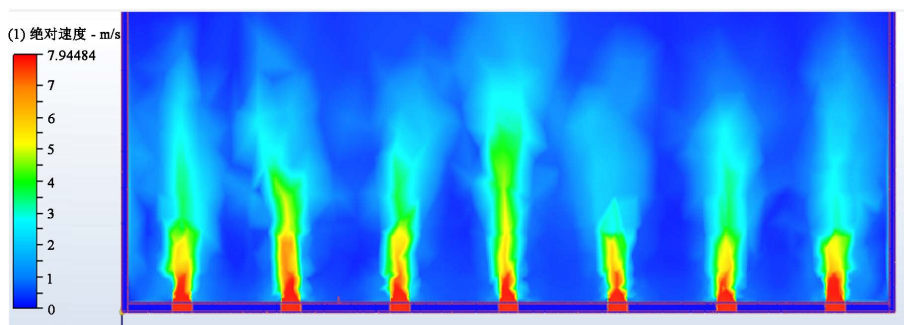


Figure 6. B plane absolute flow velocity distribution diagram  
图 6. B 平面流体绝对流速分布图

下图 7 所示，由上至下分别为 A1, A2, ……，A7 平面，且各平面上的流体绝对流速分布图如下所示。

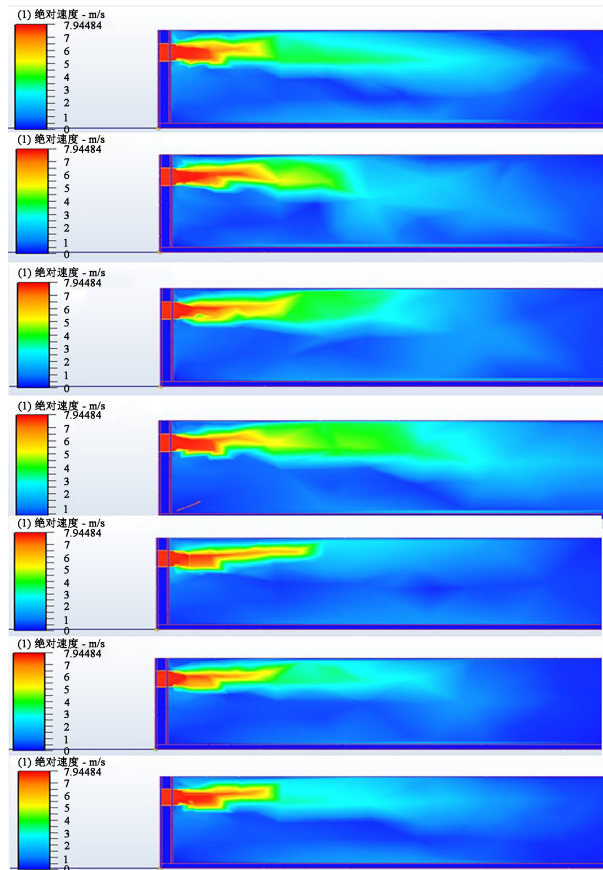


Figure 7. A plane absolute flow velocity distribution diagram  
图 7. A 平面流体绝对流速分布图

为了计算水泵中心线上流体的绝对速度分布，我们已在上面建好了 C1, C2, ……，C7 平面，再求出 C 平面上某点的绝对速度。如图 8 所示。

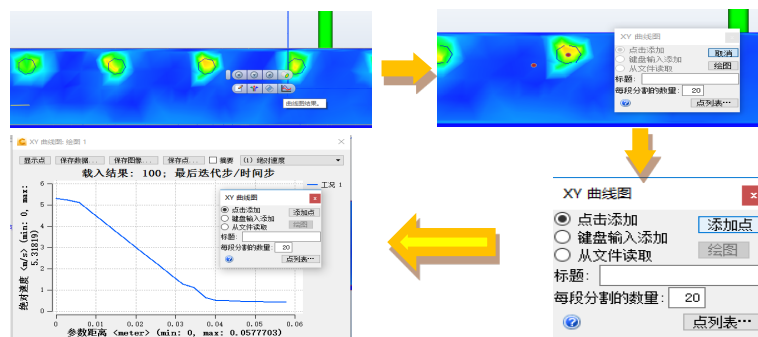


Figure 8. Analysis diagram of taking point process  
图 8. 取点过程分析图

从而在 C 平面内得出各泵体中心点连线处流体绝对流速的分布情况，如下图 9~14 所示。

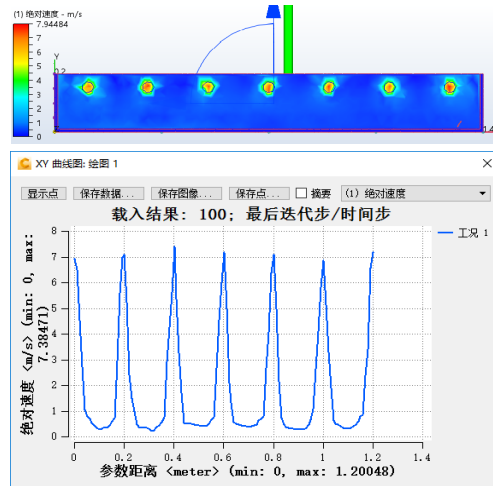


Figure 9. Velocity analysis in C1 plane  
图 9. C1 平面流速分析

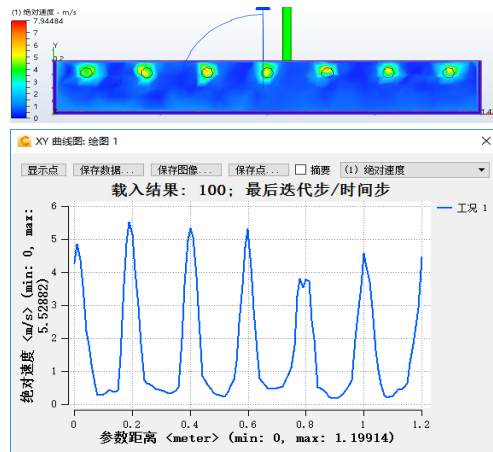


Figure 10. Velocity analysis in C2 plane  
图 10. C2 平面流速分析

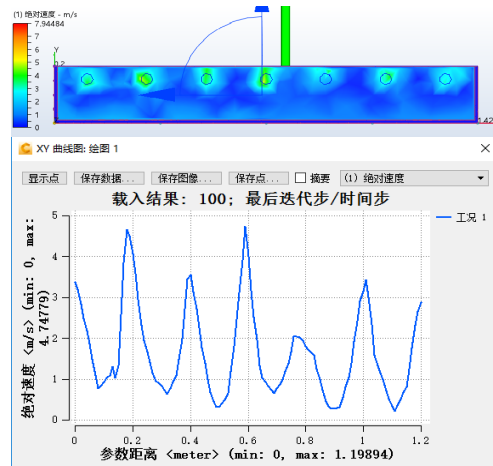


Figure 11. Velocity analysis in C3 plane  
图 11. C3 平面流速分析

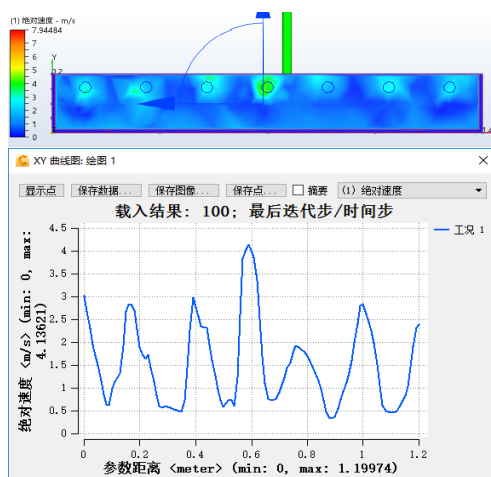


Figure 12. Velocity analysis in C4 plane  
图 12. C4 平面流速分析

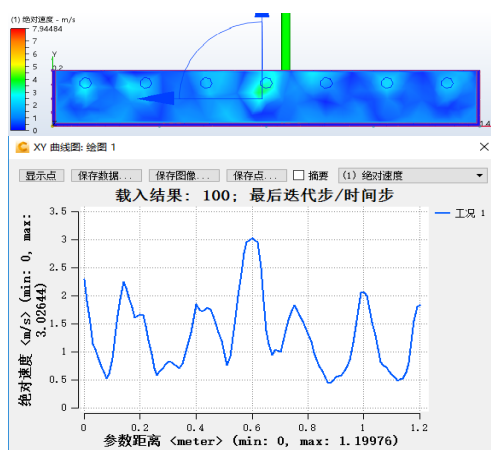


Figure 13. Velocity analysis in C5 plane  
图 13. C5 平面流速分析

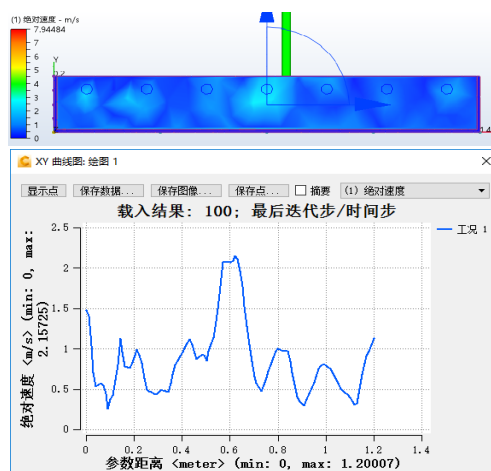


Figure 14. Velocity analysis in C6 plane  
图 14. C6 平面流速分析



将相关数据导入 Excel 中，并挑选出有用数据，如下表 1 和表 2 所示。

**Table 1.** Absolute velocity of water pump centerline at plane C

**表 1.** 水泵中心线在 C 平面处的绝对速度

	水泵中心线在 C 平面处的绝对速度						
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7
C1	6.90488	7.06678	7.38471	7.15883	7.08027	6.87191	7.18973
C2	4.84857	5.52882	5.32827	5.30764	3.81762	4.56838	4.45114
C3	3.37902	4.656	3.54253	4.74779	2.05333	3.42442	3.42442
C4	3.02545	2.83384	2.97995	4.13621	1.92917	2.83644	2.39625
C5	2.29583	2.2506	1.84937	3.02644	1.83663	2.05157	1.83344
C6	1.47513	1.13232	1.12453	2.15725	1.00036	0.810014	1.13051

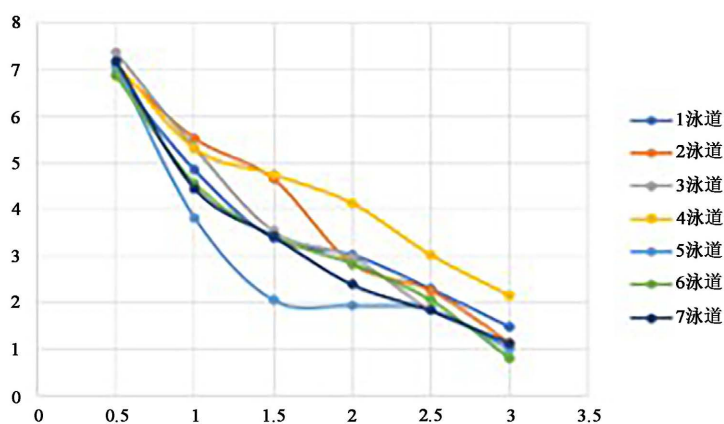
**Table 2.** Absolute velocity of the center point of the two water pumps at plane C

**表 2.** 两水泵中心点在 C 平面处的绝对速度

	距离水泵某一距离的 C 平面上的距离水泵中心线 1 m 处的流体绝对速度							
	两水泵中心点在 C 平面处的绝对速度							
	n1	n2	n3	n4	n5	n6	n7	n8
C1	0	0.279603	0.227171	0.399238	0.386089	0.278163	0.315679	0
C2	0	0.2739	0.327956	0.244285	0.469161	0.19233	0.216866	0
C3	0	0.765498	0.627229	0.324977	0.663975	0.291118	0.218403	0
C4	0	0.617035	0.480098	0.601594	0.731133	0.335179	0.455979	0
C5	0	0.530427	0.587724	0.760659	0.941308	0.441273	0.482889	0
C6	0	0.254222	0.43853	0.873188	0.478429	0.301479	0.304885	0

注: C(1~6): 表示数据点所在平面; m(1~7): 各水泵中心线与 C 平面的交点; n(1~7): 表示两水泵中心处与 C 平面的交点。

作出从左至右, 1~7 泳道, 在其各自泳道水泵中心线方向的流体的绝对速度分布, 如下图 15 所示。



**Figure 15.** Absolute velocity distribution curve of water pump centerline

**图 15.** 水泵中心线绝对速度分布曲线

作出从 C1 至 C6 平面，1~7 泳道，在 C 平面的绝对速度分布如下图 16 所示。

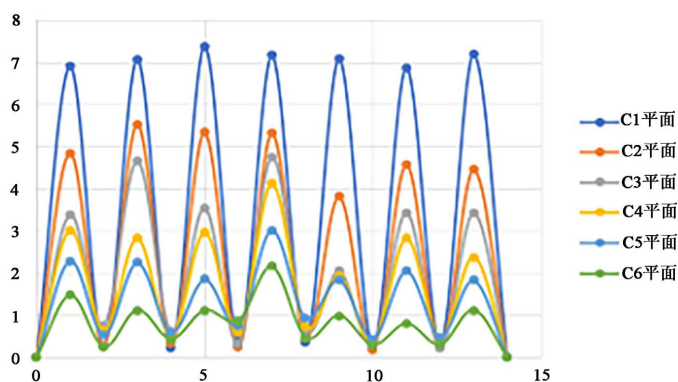


Figure 16. The absolute velocity distribution curve in the C plane  
图 16. C 平面上绝对速度分布曲线

### 3.3. 数据分析

因为在里约奥运会男子 200 米比赛中，孙杨用时 1 分 44 秒夺冠，平均游泳速度为 1.9231 m/s，因此可用上述 C7 平面进行分析。且由 CFD 的模拟结果，若游泳者的体质相同，即在游泳过程中可以产生相同的驱动力，则各泳道游泳者由于不同的粘性阻力，造成其所能达到的游泳速度不同。

若 4 泳道游泳者的速度为： $v_4 = 2.15725 \text{ m/s}^2$ 。则 1 至 7 泳道游泳者的速度为： $v_1 = 1.47513 \text{ m/s}^2$ ， $v_2 = 1.13232 \text{ m/s}^2$ ， $v_3 = 1.12453 \text{ m/s}^2$ ， $v_5 = 1.00036 \text{ m/s}^2$ ， $v_6 = 0.810014 \text{ m/s}^2$ ， $v_7 = 1.13051 \text{ m/s}^2$ 。

且各泳道游泳者所受到的粘性阻力，由公式  $F = A\mu dv/dy$  可求出，即从 1 至 7 泳道游泳者所受到的粘性阻力为：

$$\begin{aligned} F_1 &= 2A\mu dv/dy \\ &= 1.131 \times 0.894 \times 10^{-3} \times (2 \times 1.47513 - 0.25422)。 \\ &= 0.00273 \text{ N} \end{aligned}$$

同理可求， $F_2 = 0.00159 \text{ N}$ ， $F_3 = 0.00095 \text{ N}$ ， $F_4 = 0.00300 \text{ N}$ ， $F_5 = 0.00123 \text{ N}$ ， $F_6 = 0.00103 \text{ N}$ ， $F_7 = 0.00198 \text{ N}$ 。

其粘性阻力如下图 17 所示：

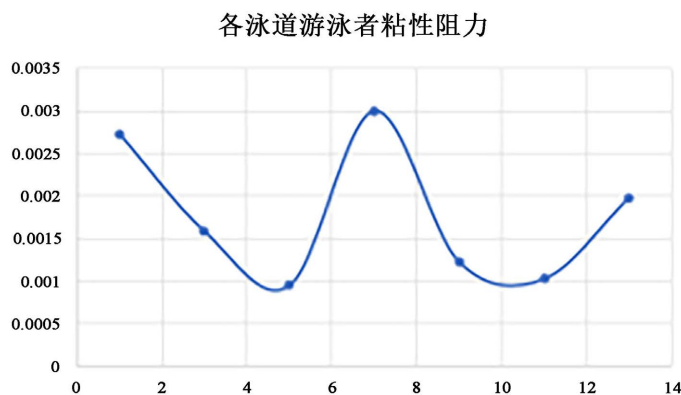


Figure 17. Viscous resistance curves of each swimming lane  
图 17. 各泳道粘性阻力曲线

由上分析可知,中间泳道所受到的粘性阻力最大,但从 CFD 模拟求解结果可知,具有相同初动能的水流,在相同时刻,中间泳道的水流的绝对流速最大,即克服粘性阻力所做功小,但中间泳道的粘性阻力又是最大的,这两种条件显然是矛盾的。因而我猜测各泳道的粘性阻力与各泳道间的速度差值有关,即随着比赛时间的增大,各泳道速度差值渐增,从而导致中间泳道粘性阻力增大。① 比赛起始,各游泳者游动速度较低,受粘性阻力影响较低,因此各游泳者的速度近似相等,但由于两游泳者中间的流速不为 0,从而致使中间游泳者的速度梯度小,粘性阻力较两侧的小。② 在游泳者加速过程中,由于中间游泳者所受到的粘性阻力小,其游泳速度升高较快,导致各游泳者的游动速度的差值增大,从而致使中间游泳者的速度梯度增大,其粘性阻力逐渐增大,即两侧的游泳者对中间的游泳者的游动起到阻碍的效果。③ 由于粘性阻力的增大,中间游泳者的游动速度将会下降。最后导致游泳者的游动速度之比趋于定值。即中间泳道的粘性阻力先逐渐增大,达到一定值时,粘性阻力在此值上下波动。

为了验证猜想,对实验数据加工,若下表 3 所示,求出各水泵中心线在 C 平面处的粘性切应力。

**Table 3.** Viscous shear stress of each swimming lane

**表 3.** 各泳道粘性切应力

	水泵中心线在 C 平面处的粘性切应力(N/m <sup>2</sup> )						
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7
C1	0.01210	0.01218	0.01264	0.01210	0.01207	0.01176	0.01257
C2	0.00842	0.00935	0.00902	0.00885	0.00623	0.00780	0.00776
C3	0.00536	0.00708	0.00548	0.00761	0.00282	0.00567	0.00495
C4	0.00486	0.00409	0.00436	0.00620	0.00250	0.00436	0.00388
C5	0.00363	0.00302	0.00210	0.00389	0.00205	0.00284	0.00285
C6	0.00241	0.00141	0.00084	0.00265	0.00109	0.00091	0.00175

以上数据为基础,泳道速度相对差值从 0 开始增大,且假设 7 泳道粘性切应力为 1,求出其他泳道的相对粘性切应力如下表 4 所示。

**Table 4.** Relative viscous shear stress of each swimming lane

**表 4.** 各泳道相对粘性切应力

	水泵中心线在 C 平面处的相对粘性切应力(N/m <sup>2</sup> )						
	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7
C1	0.96261	0.96897	1.00557	0.96261	0.96022	0.93556	1
C2	1.08505	1.20490	1.16237	1.14046	0.80284	1.00515	1
C3	1.08283	1.43030	1.10707	1.53737	0.56970	1.14545	1
C4	1.25258	1.05412	1.12371	1.59794	0.64433	1.12371	1
C5	1.27368	1.05965	0.73684	1.36491	0.71930	0.99649	1
C6	1.37714	0.80571	0.48	1.51429	0.62286	0.52	1

则中间泳道的相对粘性切应力如下图 18 所示;且下曲线符合假设内容,假设正确。

中间泳道相对粘性切应力

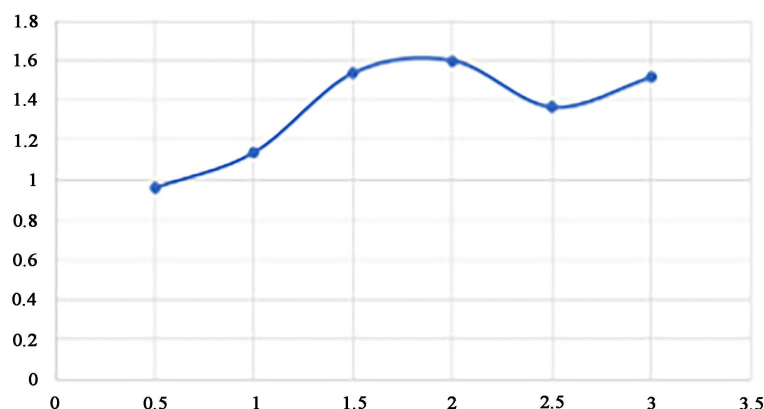


Figure 18. Relative viscous shear stress curve of middle swimming lane  
图 18. 中间泳道相对粘性切应力曲线

#### 4. 游泳比赛场地的改进

1) 由牛顿粘性应力公式, 易知, 最直接也是最可靠的减小粘性应力的方式是减小其流层间的速度梯度, 但由上分析游泳者所受粘性阻力时, 由于隔离带在水深方向的尺寸不大, 因而其对流体的传递流速的影响不大, 可忽略隔离带的影响, 但若将隔离带换为隔离层的话, 即隔离层的水深方向的尺寸大时, 隔离带与池壁所起到的作用相同, 从而致使隔离带附近流速为 0, 即将一个大游泳池在结构上划分为 7 个小游泳池, 他们之间近似互不影响, 且显然此时不论游泳者在哪个泳道, 其所受到的粘性阻力近乎相同, 粘性阻力对比赛成绩的影响很小, 因而比赛更显公平。

2) 在游泳池壁附近增加传送带类装置, 其装置如下图所示。且当游泳者向左游动时, 隔离带随着传动系统向左移动, 当游泳者向右游动时, 隔离带随着传动系统向右移动, 通过减小游泳者与游泳池壁间的速度梯度来减小各泳道粘性阻力差值。如图 19 所示为改进后的泳池结构。

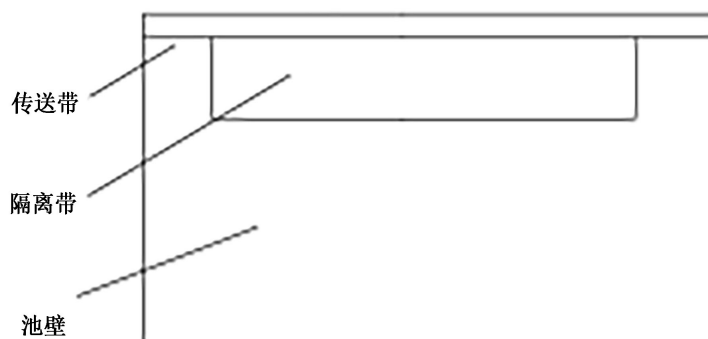


Figure 19. Conveyor belt type swimming pool wall  
图 19. 类传送带装置式泳池壁

#### 5. 结论

总的来说, 粘性阻力对中间游泳者起有利作用。中间泳道所受到的粘性阻力最大, 但从 CFD 模拟求解结果可知, 具有相同初动能的水流, 在相同时刻, 中间泳道的水流的绝对流速最大, 即克服粘性阻力所做功小, 但中间泳道的粘性阻力又是最大的, 这两种条件显然是矛盾的。因而各泳道的粘性阻力与各

泳道间的速度差值有关,即随着比赛时间的增大,各泳道速度差值渐增,从而导致中间泳道粘性阻力增大。① 比赛起始,各游泳者游动速度较低,受粘性阻力影响较低,因此各游泳者的速度近似相等,但由于两游泳者中间的流速不为0,从而致使中间游泳者的速度梯度小,粘性阻力较两侧的小。② 在游泳者加速过程中,由于中间游泳者所受到的粘性阻力小,其游泳速度升高较快,导致各游泳者的游动速度的差值增大,从而致使中间游泳者的速度梯度增大,其粘性阻力逐渐增大,即两侧的游泳者对中间的游泳者的游动起到阻碍的效果。③ 由于粘性阻力的增大,中间游泳者的游动速度将会下降。最后导致游泳者的游动速度之比趋于定值。即中间泳道的粘性阻力先逐渐增大,达到一定值时,粘性阻力在此值上下波动。

从以上分析中,我们可得出结论,比赛初始阶段,中间泳道粘性阻力较小,粘性阻力的影响对中间游泳者的起步加速是有利的。但若中间游泳者处于领先时,两侧的游泳者对其游动起阻碍作用,从而增大中间游泳者的粘性阻力,于是粘性阻力的影响对中间游泳者的稳定游动阶段是不利的。但当中间游泳者处于落后时,粘性阻力又起有利作用。

## 参考文献

- [1] 张晓侠,马吉光. CFD 仿真技术在游泳运动力学问题研究中的应用[J]. 体育科学, 2013, 33(7): 70-75. <https://doi.org/10.16469/j.css.2013.07.013>
- [2] Gardano, P. and Dabnichki, P. (2006) On Hydrodynamics of Drag and Lift of the Human Arm. *Journal of Biomechanics*, **39**, 2767-2773. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.10.005>
- [3] Zaidi, H., Taiar, R., Fohanno, S., et al. (2008) Analysis of the Effect of Swimmer's Head Position on Swimming Performance Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Biomechanics*, **41**, 1350-1358. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.02.005>
- [4] Marinho, D.A., Carvlho, F., Barbosa, T.M., et al. (2009) The Determination of Drag in Gliding Phase in Swimming [EB/OL]. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/3682>, 2013-01-21.
- [5] Novais, M.L., Silva, A.J., Mantha, V.R., et al. (2004) The Effort of Depth on Drag during the Streamlined Glide: A Three-Dimensional CFD Analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **36**, 1029-1035.
- [6] Silva, A.J., Rouboa, A., Moreira, A., et al. (2008) Analysis of Drafting Efforts in Swimming Using Computational Fluid Dynamics. *Journal of Sports Science and Medicine*, **7**, 60-66.
- [7] Hanna, R.K. (2012) CFD in Sport—A Retrospective: 1992-2012. *Procedia Engineer*, **34**, 622-627. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.106>