

# 雷诺数对水下航行器周围流场影响的数值模拟研究

吴强<sup>1</sup> 安翼<sup>1,2</sup> 蔡淑婷<sup>1,2</sup> 黄仁芳<sup>1,2</sup>

1(中国科学院力学研究所, 邮编 100190), 2(中国科学院大学工学院, 邮编 100049)

**摘要** 本文对水下航行器(DARPA SUBOFF)开展了大涡模拟研究,讨论了雷诺数对其表面受力和尾流区流动结构的影响,比较了5种雷诺数的结果(基于体长 $L$ 和自由来流速度 $U_\infty$ ): $Re_L=1.2\times 10^6, 1.2\times 10^7, 1.4\times 10^7, 2.0\times 10^7, 1.0\times 10^8$ 。与已发表的在 $Re_L=1.2\times 10^6$ 下的实验和模拟结果相比,本文获得的压力系数 $C_p$ 、表面摩擦系数 $C_f$ 以及尾迹速度分布等结果与其吻合良好。结果表明:对于 $Re_L\sim 10^6\sim 10^8$ 的SUBOFF模型,尾部边界层厚度因受逆压梯度强烈影响均显著增长;尾流中湍动能分布呈明显的双峰特征;尾流远处的最大速度亏损和尾迹宽度演化基本上呈现自相似性;压力系数 $C_p$ 对雷诺数的变化不敏感,但随着雷诺数的增加,表面摩擦系数 $C_f$ 逐渐降低,基本符合关系式 $C_f\sim Re_L^{-1/5}$ 。

**关键词:** 水下航行器, 尾流, 湍流模型, 大涡模拟

## 一、模型

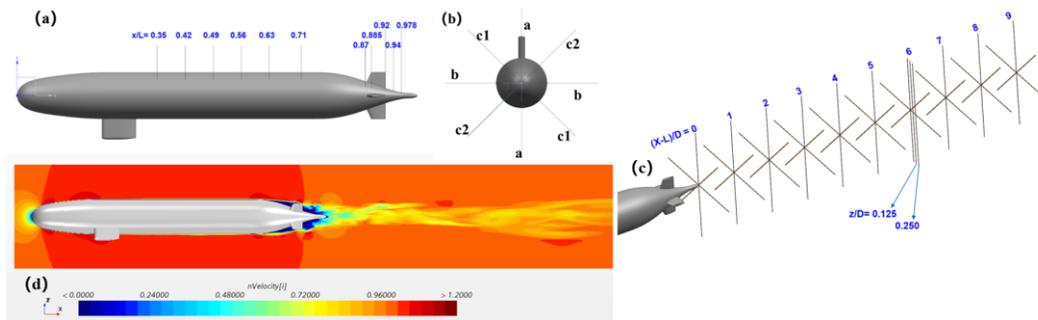


图1 模拟采用的几何模型和观测位置

目前研究大多是基于模型尺度的水池试验或数值模拟。然而模型雷诺数(约 $10^6$ 量级)与实体雷诺数(约 $10^9$ 量级)通常存在3个量级的差,迫切需要深入研究不同雷诺数下的流场特性。本文模拟采用的几何模型和观测位置如图1所示。设定原点位于头部最尖端处,计算区域<sup>[1]</sup>为圆柱体 $[-2.6D, 23.2D]\times[-4.3D, 4.3D]\times[-4.3D, 4.3D]$ ,其中 $D$ 为主体的最大直径 $D=0.508\text{m}$ , $L$ 为主体的长度 $L=8.5748D=4.356\text{m}$ ,网格数量约5亿。

## 二、结果

### 2.1 对比验证

压力系数 $C_p = (p - p_\infty)/0.5\rho U_\infty^2$ 和表面摩擦系数 $C_f = \tau_w/0.5\rho U_\infty^2$ 的时均分布( $p_\infty$ 为自由来流压力)与试验<sup>[2][3]</sup>和模拟<sup>[4][5]</sup>结果吻合得很好,如图2所示。尾流下游 $6D$ 处的无量纲流向时均速度分布 $V_{mx}/V_{me}$ 和XY平面的脉动速度相关性 $V_{fx}V_{fy}/V_{me}^2$ 与试验<sup>[2][3]</sup>和模拟<sup>[4][5]</sup>结果相比基本一致,如图3所示,其中 $V_{me}$ 为尾迹边缘速度。

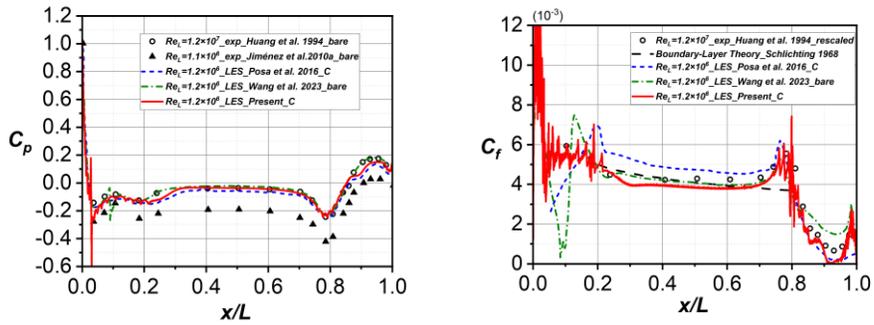


图 2 压力系数 $C_p$ 和表面摩擦系数 $C_f$ 的时均分布对比 ( $Re_L=1.2\times 10^6$ )

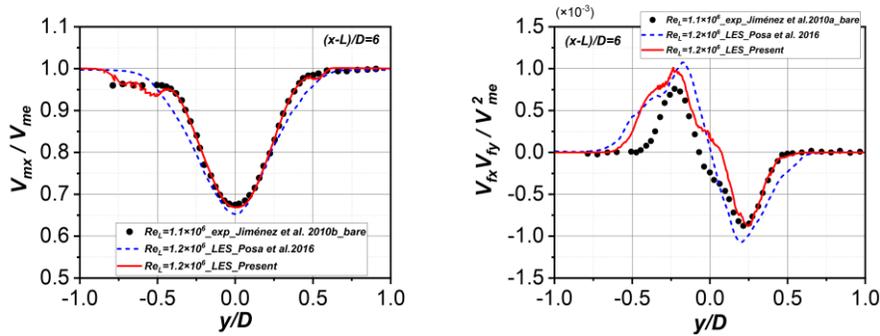


图 3 流向速度分布 $V_{mx}/V_{me}$ 和 XY 平面的脉动速度相关性 $V_{fx}V_{fy}/V_{me}^2$ 对比

## 2.2 分析结果

图 4 表明：尾部边界层厚度因受逆压梯度影响严重而显著增长。

图 5 表明：尾流中湍动能的分布呈现明显的双峰特征，但在  $9D$  范围内还没发展到自相似状态；尾流远处的最大速度亏损和尾迹宽度演化基本上呈现自相似性。

图 6 表明：表面压力系数 $C_p$ 对雷诺数的变化不敏感，但随着雷诺数的增加，表面摩擦系数 $C_f$ 逐渐降低，基本符合关系式 $C_f \sim Re_L^{-1/5}$ ，在高雷诺数下偏差较大，这可能由于壁面网格解析不充分造成的，这提示我们在高雷诺数条件下需要采用特殊的壁面处理方式以克服壁面网格解析不足的影响。

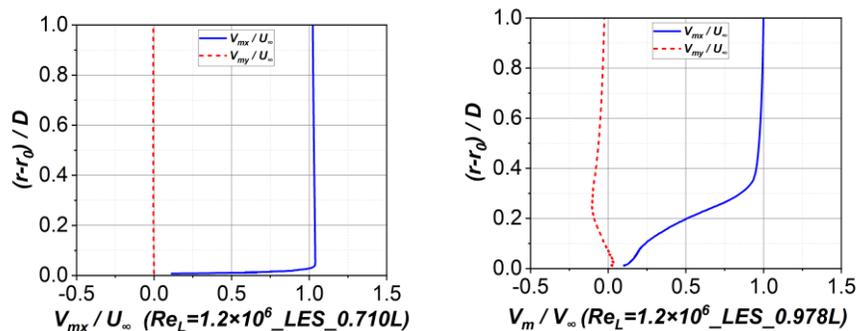


图 4 沿水下航行器径向观测处的速度分布 (左  $0.710L$  处; 右  $0.978L$  处)

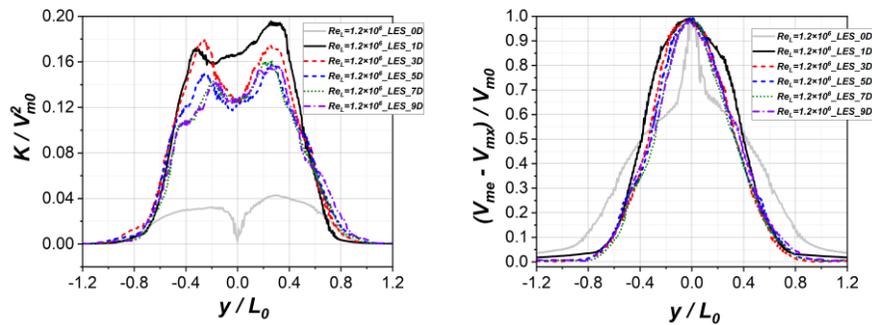


图 5 尾流中湍动能的分布和最大速度亏损

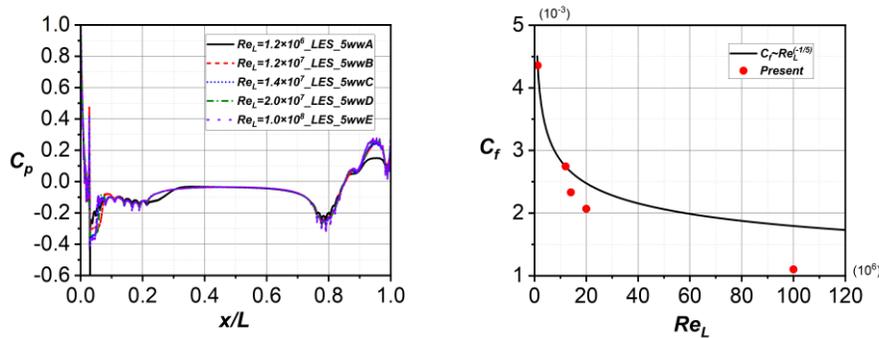


图 6 压力系数 $C_p$ 和表面摩擦系数 $C_f$ 与雷诺数的关系

### 三、结论

本文对带附体的水下航行器开展了大涡模拟研究，结果表明：不同雷诺数下，船尾边界层厚都显著增长；尾流中湍动能的分布呈现明显的双峰特征；尾流远处的最大速度亏损和尾迹宽度演化基本上呈现自相似性；压力系数 $C_p$ 对雷诺数的变化不敏感，表面摩擦系数 $C_f$ 基本符合关系式 $C_f \sim Re_L^{-1/5}$ 。

### 参 考 文 献

- 1 Zhou, Z., Li, Z., Yang, X., Wang, S. & Xu, D. Investigation of the wake characteristics of an underwater vehicle with and without a propeller. *Ocean Engineering* 266, 113107 (2022).
- 2 Jiménez, J. M., Hultmark, M. & Smits, A. J. The intermediate wake of a body of revolution at high Reynolds numbers. *J. Fluid Mech.* 659, 516–539 (2010a).
- 3 Jiménez, J. M., Reynolds, R. T. & Smits, A. J. The Effects of Fins on the Intermediate Wake of a Submarine Model. *Journal of Fluids Engineering* 132, 031102 (2010b).
- 4 Posa, A. & Balaras, E. A numerical investigation of the wake of an axisymmetric body with appendages. *J. Fluid Mech.* 792, 470–498 (2016).
- 5 Posa, A. & Balaras, E. A numerical investigation about the effects of Reynolds number on the flow around an appended axisymmetric body of revolution. *J. Fluid Mech.* 884, A41 (2020).
- 6 Jones, M. B., Erm, L. P., Valiyff, A. & Henbest, S. M. Skin-friction Measurements on a Model Submarine (2013).