中高速水下航行体流动涡控机理研究

马国祯，黄伟希

(清华大学航天航空学院，北京，100084, Email: hwx@tsinghua.edu.cn)

摘要：潜艇桨盘面伴流作为螺旋桨的入流条件，流场的周向不均匀性与螺旋桨的振动和噪声有很重要的关系。本研究针对中高速水下航行体主附体交接部流动噪声的控制需求，选择全附体 SUBOFF 模型（包含艇体、指挥塔围壳、方向舵、稳定翼等）为计算模型，采用 DES 数值模拟方法，综合考虑计算精度和计算网格的影响，进行艇身流场数值模拟，精细捕捉突起物周围（主要是指挥台围壳）以及尾流区域的流场结构。进一步，提出一种被动控制方案，有效抑制了主附体交接部马蹄涡造成的桨盘面速度分量的周向不均匀性。

关键词：全附体潜艇；流动涡控；DES，周向不均匀

1 引言

中高速水下航行体噪声仍然是目前潜艇探测所依靠的主要信号特征，继续降低噪声仍然是目前水下航行体的重点发展方向之一。螺旋桨噪声是潜艇的主要噪声源之一。 螺旋桨工作于潜艇的尾流区中，潜艇尾流品质与螺旋桨的噪声有直接的关系。 由于潜艇尾流存在很大的周向不均匀性，使得该处工作的螺旋桨桨叶在旋转过程中受到的来流攻角和速率剧烈变化，导致叶剖面上产生的推力和扭矩也随之发生变化，从而产生了螺旋桨的转动噪声，并会激励艇尾壳体产生振动噪声，同时进流不均匀性还可能对螺旋桨空泡噪声特性有明显的影响，因此减小潜艇尾流的周向不均匀性是降低潜艇螺旋桨噪声的重要途径。

潜艇尾流的周向不均匀性是由于其几何外形特点决定的。 典型的潜艇都是由主艇身与指挥台围壳、尾翼等附体组成，在主附体的接合部，由于形状的突变，潜艇表面湍流在生成与发展的过程中受到干扰，形成特殊的马蹄涡结构，马蹄涡具有强度高，耗散弱的特点，当传播至螺旋桨盘面处时，与主艇体尾流、附体尾流发生相互作用，使潜艇尾流成为以湍流脉动、黏性效应和漩涡运动为特征的复杂流场区域，导致潜艇尾流严重的不均匀性。 近些年国内外在开展潜艇尾流形态特征研究的同时，也对潜艇尾流的控制方法进行了大规模的研究，并得到了一些潜艇尾流控制的具体技术措施。 总的指导思想是在不改变潜艇艇体

和附体形状的条件下，通过设置附加装置来改善潜艇尾流形态，使得潜艇桨盘面处流场的均匀性提高，从而降低螺旋桨噪声[1]。

本研究首先分析了不同湍流模型对于潜艇流场在高雷诺数工况下的计算精度对比，然后运用分离涡（DES）计算方法，对指挥台围壳处增加侧面挡板的全附体潜艇流场进行了数值模拟计算，展现了该控制方案可以很好的改善潜艇尾流周向不均匀性、提高潜艇螺旋桨入流品质，有利于降低潜艇螺旋桨的噪声。

2 控制方程和数值方法

雷诺方程的笛卡尔张量形式为[2]：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u_i\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)$$

式中,雷诺应力不封闭,需要模化。关于模化的湍流模式,选择RANS的$k-\varepsilon$，$k-\omega\ SST$ [3]和DES [4]3 种。

计算基于开源软件 OpenFOAM 平台，采用有限体积法（FVM）对控制方程进行离散，方程中的对流项采用二阶迎风差分格式离散；扩散项采用中心差分格式离散；时间项采用二阶隐式差分格式离散；压力速度耦合方程采用 PISO 法求解。数值离散后的代数方程组用 Gauss-Seidel 迭代法求解，并以多重网格技术加速迭代收敛。

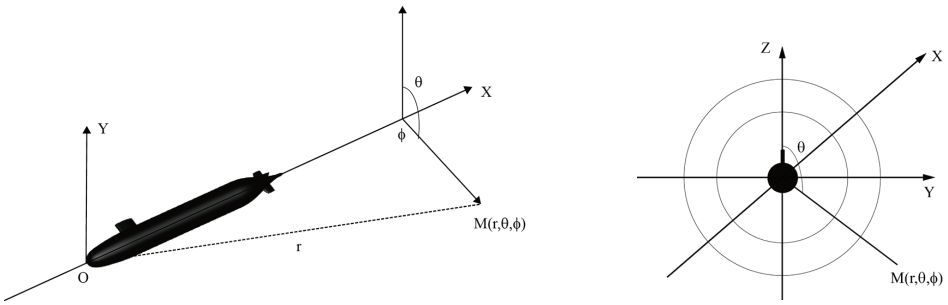

图 1 以潜艇为中心的坐标系

为了检验本方法的有效性，采用国际上开展潜艇流场计算研究的标准模型 SUBOFF AFF-8 模型进行流场数值模拟计算。SUBOFF AFF-8 模型为带指挥台围壳和稳定翼的轴对称体，其外形见图 1。艇体总长 L 为 4.356m，其中进流段长 1.016m，平行舯体长 2.229m，去流段长 1.111m（后体端部长 0.095m），最大直径 D 为 0.508m。指挥台围壳长 0.368m，高 0.460m，截面为椭圆形，其长短轴之比为 2：1，顶部为有外凸的椭圆盖。指挥台前缘

位于 0.924m 处，后缘位于 1.923m 处。稳定翼为十字型布置，翼后缘位于 4.007m 处。

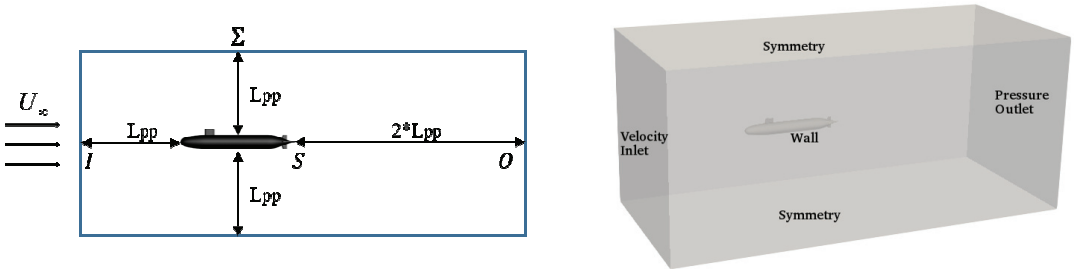

图 2 全附体潜艇计算区域及边界条件示意图

计算域及边界条件设置如图 2 所示，计算域为长 4L、宽高 2L 包围艇体的长方体（不包含艇体本身），其轴与艇模对称轴重合。进流边界面 I 为前端面，距模型艏端的距离为 L，出流边界面 O 是后端面，距模型尾端的距离为 2 L 潜艇表面 S，外边界 Σ 为圆柱体侧面。

进流面 I 的边界条件：采用速度进口边界条件，$u = U_0, v = w = 0$。U_0 其中为来流速度，保证以潜艇总长为特征长度的雷诺数 $\mathrm{Re}_L = 1.2\times10^7$。出流面 O 的边界条件：采用压力出口边界条件，参考压力取为潜艇潜航深度下的平均水压 P_A，因此相对压力取 $P = 0$。物面 S 的边界条件：满足无滑移条件。近壁区域采用壁面模型处理。控制域 Σ 的边界条件：控制域边界采用无反射远场边界条件，速度取未受扰动的主流区速度。

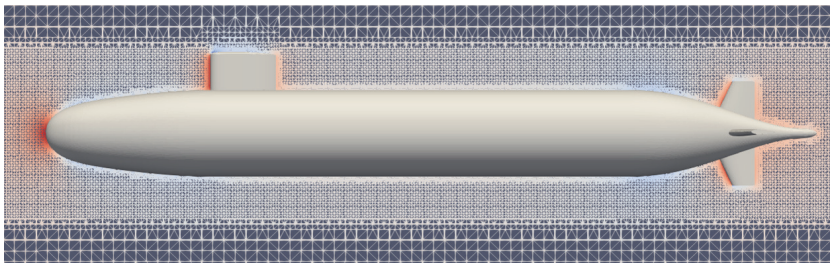

图 3 计算域纵剖面网格

为了能更好地捕捉受干扰的流场信息，对艇身附近、交接部附近及尾流场的网格进行加密。计算域的网格总数为 9.3×10^6。为了有效模拟近壁面处的流动，边界层区域内合理布置网格和选择适合的网格尺度。

3 结果与讨论

首先利用不同湍流模型进行潜艇艇身流场的数值模拟，验证计算方法的可靠性，进一步选择合适的湍流模型进行后面涡控设计的分析。

图 4 给出了不同湍流模型计算得到的潜艇纵中剖面线上半部分压力系数以及摩擦阻力系数的纵向分布，不同湍流模型的差别主要体现在几个峰值位置的捕捉，主要包括指挥台围壳和尾翼部位，但整体均与实验结果吻合较好。同时给出了 Huang[5]对 SUBOFF 裸艇体模型 AFF-1 的实测结果和本研究的计算结果，通过比较可以看出，除在非常靠近附体的区域外，附体对艇体所受的影响都很小。

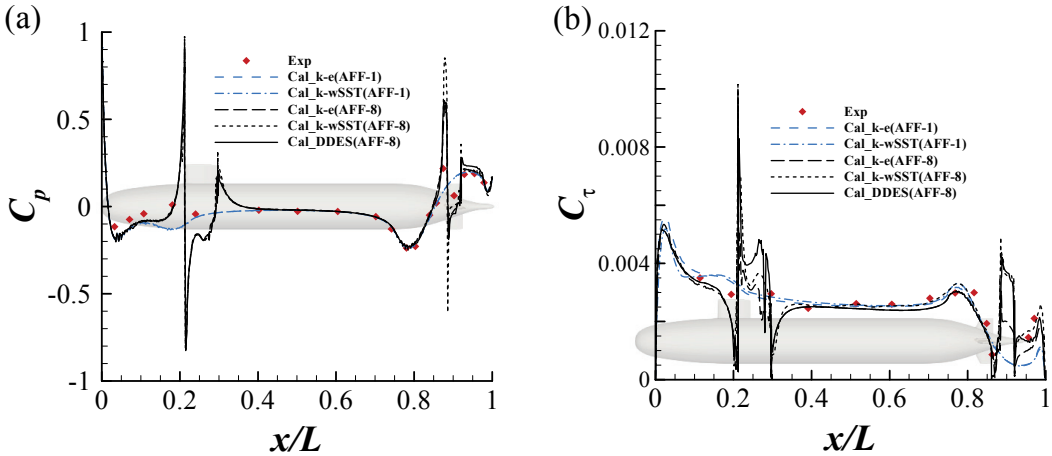

图 4 纵中剖面线上半部分的(a)压力系数和(b)摩擦阻力系数纵向分布

水下物体大多数的附体都会产生额外的阻力和引起湍流而产生纵向涡，这就是螺旋桨附近流场不均匀和瞬时脉动流存在的原因。本模型中桨盘面为 $x/L=0.978$ 处。图 5(a-c)为流场速度周向分布曲线图。图中 θ 为从艇尾看过去的顺时针周向角，其中 $0°$ 位于桨盘面对称面的正上方，$180°$ 位于对称面的正下方，具体参见图 1。图 5(d)为桨盘面处轴向速度的周向平均值沿半径的分布。这里仅对桨盘面处半径 $r/R=0.25$ 上的速度以及轴向速度的周向平均值的计算结果与 Huang 提供的测量值以及 Bull 提供的计算结果进行了对比。结果显示，本文计算结果分布趋势与测量值比较接近，虽然在数值上仍有一定的偏差，但较 Bull [6]提供的计算结果有很大的改进。

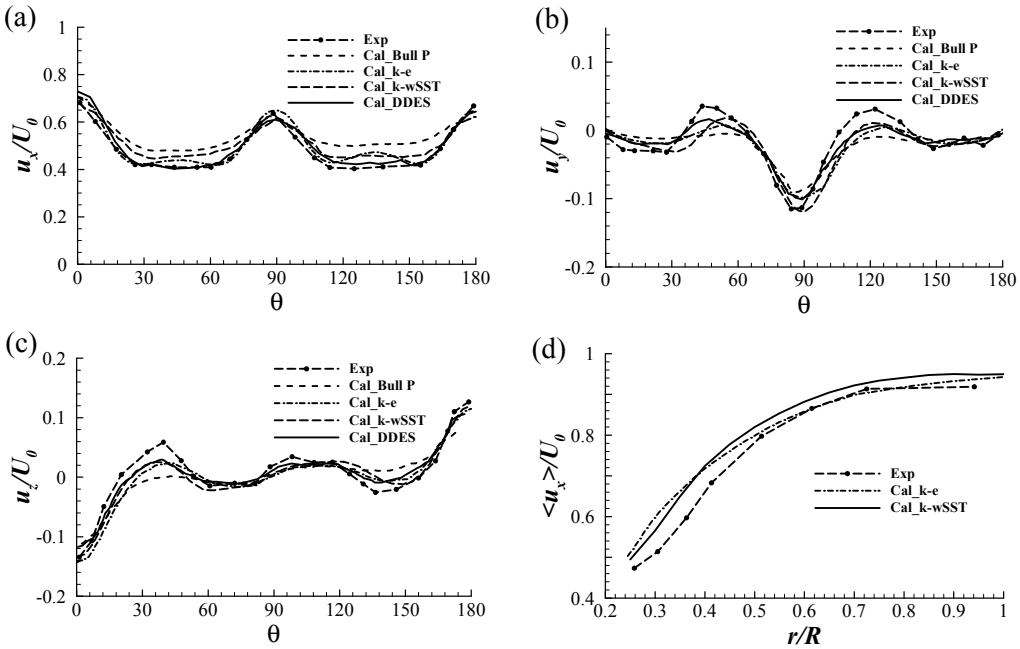

图 5 桨盘面上 r/R=0.25 处的 *x, y, z* 三向平均速度及轴向速度的周向平均值

要产生有利的附涡，消涡整流片需要安装在附体与马蹄涡涡核位置之间，且能充分吸收附体首部绕流中的横向速度分量。 根据指挥台围壳、尾翼的形状与尺寸，本文分别设计了相应的消涡整流片，SUBOFF 模型指挥台围壳处的消涡整流片尺寸与安装位置如图 6 所示。和与前述验证相同算例工况下，本研究使用 DES 方法对施加了指挥台围壳侧面挡板控制的 SUBOFF 潜艇流场数值模拟，图 7 给出了 SUBOFF 桨盘面 r/R=0.25 处流体的轴向速度分量随周向角的变化曲线，可以看出，消涡整流片具有优良的减弱马蹄涡对尾部流场影响、并提高桨盘面周向均匀性的效果。

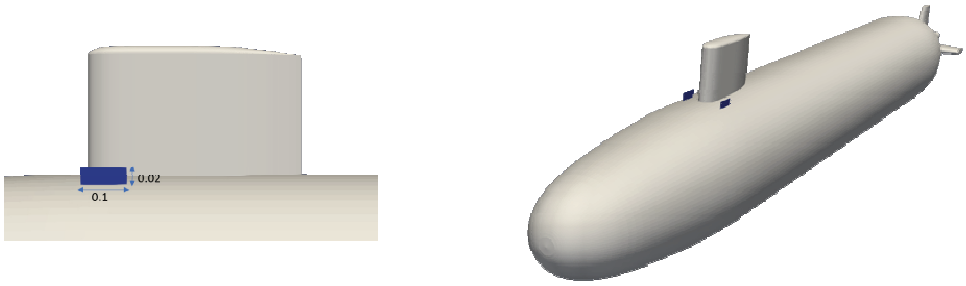

图 6 指挥台围壳侧面处增加挡板和整体模型

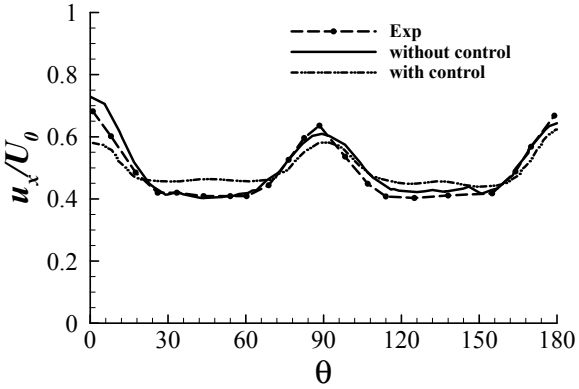

图 7 桨盘面上 r/R=0.25 处的 x 向平均速度周向分布

4 结论

通过不同湍流模型进行全附体 SUBOFF 潜艇艇身流场的数值模拟，并与艇身纵剖面分布压力、桨盘面速度周向分布等实验数据进行了比较，结果吻合较好，验证了方法的可靠性。在此基础上，设计了一种在指挥台围壳侧面添加挡板的被动控制方案，有效减弱了交接部产生的马蹄涡对尾部流场影响，改善了桨盘面周向流动的均匀性。

参 考 文 献

1 Zhi-Hua L , Ying X , Cheng-Xu T U . The method to control the submarine horseshoe vortex by breaking the vortex core[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser.B, 2014, 26(4):637-645.

2 张兆顺，崔桂香，许春晓. 湍流理论与模拟[M]. 北京：清华大学出版社，2005.

3 DAVID C, WILCOX. Formulation of the k-ω Turbulence Model Revisited[C]. Reno: 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007.

4 Spalart PR, Jou W-H, Strelets M, Allmaras SR. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. In: Liu C, Liu Z, editors. Advances in DNS/LES. Greyden Press; 1997.

5 Huang T, Liu H L, Groves N et al. Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel: the DARPA SUBOFF experimental program. In: Proceeding of 19th Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea.

6 Bull P. The validation of CFD predictions of nominal wake for the SUBOFF fully appended geometry. In: Proceedings of 21st Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, Norway, 1996.

Numerical study on vortex control mechanism of high-speed underwater vehicle

MA Guo-Zhen, HUANG Wei-Xi

(AML, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084.
Email: hwx@tsinghua.edu.cn)

Abstract: The submarine wake at the propeller disc is the inflow of the submarine propeller, and the circumferential uniformity of the wake has direct influence on the vibration and noise of submarine propeller. In this paper, we choose the full-appendage SUBOFF model (including hull body, sail, stern) as the calculation model. Using the DES method, numerical simulation of the flow-field around the SUBOFF model are carried out. The flow field structures are captured around the bumps and in the wake region. Then we design a kind of passive control scheme, in order to effectively restrain the main appendage handover of the horseshoe vortex and decrease non-uniformity of the circumferential velocity component at the propeller disc.

Key words: fully-appendage submarine; vortex control; DES; circumferential non-uniformity