

深潜救生艇阻力性能数值计算方法研究

李 岩, 谢以恒, 钟后阳

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266000)

摘要: 现阶段, 深潜救生艇作为援潜救生的重要力量, 一直以来都被各国所重视。2000年“库尔斯克”号潜艇事故发生后, 各国进一步加大了对深潜救生艇的研制力度。但目前, 各国对深潜救生艇 CFD 数值仿真计算方法的研究很少, 对深潜救生艇设计原理的探索可以有效提升我国自主研发能力。为获得深潜救生艇阻力及其他水动力性能较精确的计算结果, 本文针对深潜救生艇阻力性能, 根据深潜救生艇各部件对水动力特性的影响简化了三维几何模型, 总结了不同简化程度的数值计算成本。基于黏性流 CFD 方法, 依据网格划分原则, 讨论了绕流场加密区网格尺寸、边界层网格尺寸、湍流模型和艇体表面网格对数值模拟结果的影响, 建立了深潜救生艇阻力性能的数值计算方法, 为深潜救生艇国产化设计提供了理论参考。

关键词: 深潜救生艇; CFD; 网格划分

中图分类号: U667

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2022.18.041

深潜救生艇水动力线型的前处理是对其优化设计的基础。现有模型较复杂, 计算成本较高, 本文分步简化了深潜救生艇的几何模型, 保留模型中对数值模拟影响较大的部分, 探讨了不同简化程度下, 深潜救生艇水动力计算的成本和精度。基于黏性流 CFD 方法对得到的简化模型开展了试算, 探究网格划分因素对深潜救生艇阻力计算影响, 提出建议的网格划分方案。经计算验证, 本文提出的计算方法适用性较好, 有助于加深对深潜救生艇构型设计的理解以及进一步的研制与优化。

模型的简化程度较高时, 流体仿真计算效率高, 但仿真结果的误差可能较大, 反之则反。在本文对深潜救生艇装配模型进行了3种不同程度的简化, 在具体实施过程中, 本文通过直接对薄壳体进行编辑, 选中需要修改的零件首先进行隐藏操作, 通过一个个的隐藏零件的同时观察装配体外形的变化, 直到装配体外壳产生足以影响总体阻力的变化为止。对于壳体上有挖空、切除等情况的部位, 通过直接删除相关二维草图将其取出, 仅保留主体部分, 例如4号舱口盖位置的连接件, 通过对其草图修改可以使连通孔封闭, 壳体成为一个完整的圆柱。对于壳体上外肋骨部分, 通过删除几组特征使其变为间接的T型外肋骨, 再对肋骨内部中空部分进行填充。1号舱口盖处对接裙采用了这一原则, 先是删除了不影响水动力阻力的零件部分, 再修改草图去除挖空部分, 考虑到深潜救生艇主要是以艏向姿态推进, 可对航行影响较小的对接裙内部空间进行填充处理。

1 深潜救生艇几何模型前处理

1.1 深潜救生艇装配模型分析

深潜救生艇是为执行援潜救生任务而设计制造的专型潜水器, 相比科考、探测和搜寻等用途的载人潜器, 深潜救生艇需能完成多人多次搭载, 因此, 深潜救生艇在舱室容积、生命支持系统、对接系统有更高的技术指标。为满足性能要求, 深潜救生艇的壳体外安装了防撞架、电池舱、空气瓶、氧气瓶、蓄能器、浮力材料等各种设备。这些设备占空间较大, 对深潜救生艇水动力性能影响不可忽视。然而, 壳体外设备带有大量的螺栓、连接件、紧固件、加强筋、穿孔、管线等结构, 在进行 CFD 数值模拟时, 上述结构对深潜救生艇的水动力性能计算结果影响较小, 但将耗费大量的计算资源。

方案1: 深潜救生艇周围围绕了一层防撞架, 防撞架分布较稀疏, 不易造成间隙流, 且其迎流面积较小, 对阻力影响较小; 艇上装有体积较小的连接件、螺栓孔, 蓄能器、救生浮标等对艇体阻力影响较小的配件; 此外, 艇上还设有折角、台阶和格栅等尺寸较小的结构, 上述结构在进行数值模拟时将消耗大量的网格进行几何重构, 但对最终得到的阻力性能计算结果影响较小。

本文基于三维建模软件中构建的深潜救生艇实尺度装配模型开展前处理, 基于保留艇体总体结构、对流体计算结果影响较小且计算效率较高的原则, 本文尽可能地删除艇体外围突出的和贯通的结构, 尤其是本身结构复杂且对于绕流场影响较小的结构优先删除^[1]。

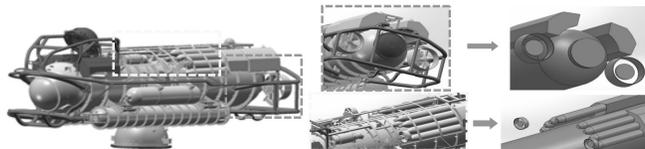


图1 三维几何模型简化流程

方案1删除了上述结构并对艇体表面作平滑处理, 简化过程如图1所示。此外, 在实际建模时, 深潜救生艇装配模型主艇体、气瓶、电源舱和转裙为薄壳结构, 在前处理时须将其填充为实心。

1.2 模型简化方案

在数值计算前处理过程中, 计算效率和精度存在矛盾。当

方案 2: 深潜救生艇的主艇体和电池舱上均装有大量结构复杂的加强筋, 主、侧推进器上有较多尺寸小、厚度薄的构件。在数值仿真中, 这些结构对深潜救生艇的阻力性能有一定影响, 但在网格生成过程中将占据大量的节点, 为研究对应的计算效率与精度, 方案 2 删除了上述结构, 作为方案 1 的对照组。

方案 3: 深潜救生艇上方共有 8 个气瓶, 由于气瓶与浮力材料在迎流方向投影重叠, 压差阻力较小, 但气瓶表面积较大, 且气瓶之前存在较多间隙, 摩擦阻力可能较大。方案 3 删除了该结构来得到气瓶对深潜救生艇总阻力的影响。

2 数值计算方法

2.1 控制方程

不可压缩流体瞬态连续性方程可表述为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0$$

式中, ρ 是密度, t 是时间, \mathbf{u} 是速度矢量, u 、 v 、 w 是速度矢量在 x 、 y 、 z 方向的分量。

根据此控制方程, 本文基于雷诺时均方法, 采用 SIMPLE 方法求解压力和速度, 设置较小的亚松弛因子以保证计算收敛, 采用二阶迎风格式离散对流和扩散项开展求解。

2.2 计算域设置和物理条件选择

将简化后的深潜救生艇三维模型导入流体仿真软件并设置流体域。流体域长约为 5.5 倍艇长, 宽和高都设为 2 倍艇长, 并将救生艇在流体域内的位置设为前 1 倍艇长, 后 3.5 倍艇长来得到充分发展的流场。本文以海水为基准进行参数设定。其中艇体边界采取了进流方向设置速度进口, 艇后方边界设置为压力出口, 其余四个面为壁面。速度为 1.54m/s。以此模拟深潜救生艇以 3 节的时速向前推进^[2]。

为了节省计算时间和计算资源, 提高计算效率, 本文在设置计算域时分层生成流体域网格。距离深潜救生艇较远的区域网格旨在捕捉远流场特征, 设置尺寸较大, 网格较稀疏; 而距离深潜救生艇较近区域旨在捕捉绕流场细节, 需要尺寸更小、更密集的网格, 故本文根据实际情况设置了两层以上的加密区域, 从而更合理地分配计算资源。网格采用切割体网格, 该种网格具有较好的正交性, 网格过渡采用 1 比 2 的方式由艇体向远场延伸。若艇体表面网格存在不平滑过渡的情况, 则采取单独切割形状较复杂的艇体表面部分进行单独加密的方式来减少网格总量。

2.3 湍流模型选择

基于上述计算方法, 本文讨论了 k - ω 湍流模型、 k - ϵ 湍流模型、标准 Spalart-Allmaras 湍流模型、雷诺湍流应力模型对深潜救生艇阻力计算的影响。计算结果显示, 基于 K - ϵ 模型的算例计算结果发散, 残差图中各项数据均波动较大, 计算难以收敛, 尤其是湍流耗散率的平均值已接近

100, 在后续计算中不予采用。标准 Spalart-Allmaras 湍流模型、雷诺湍流应力模型计算得到的阻力值差距较小, 标准 Spalart-Allmaras 湍流模型计算结果的波动相对较大, 尤其是对流动分离项的计算残差较大。雷诺湍流应力模型收敛速度较慢, 总用时比平均用时高 20%, 计算效率较低。基于 k - ω 模型计算得到阻力最高, 计算收敛速度较快, 最终得到的结果波动范围最小, 故本文选取该湍流模型进行计算^[3]。

3 简化方案与网格尺度对计算精度影响

3.1 简化方案计算成本分析

基于黏性流 CFD 方法对 1.2 节所述三种不同简化方案的深潜救生艇阻力进行计算, 方案 1 三维几何模型最复杂, 相同基础尺寸下几何重构耗费的网格量约 600 万, 方案 2 的网格数为 400 万, 方案 3 为 200 万。由于计算资源有限, 在采用相同性能计算机进行计算时, 方案 1 所用时间为 10 小时, 方案 2 为 5 小时, 方案 3 仅为 2 小时。计算收敛之后取得阻力性能结果, 方案 1 总阻力最大, 为 2045N, 方案 2 为 1590N, 方案 3 为 1372N。

第一种简化模型由于保留了艇体上大部分构件, 尤其是迎流面积较大的外肋骨, 使得其阻力值最大, 但由于耗费的网格数较多, 导致计算时间过长, 如果基于该方案进行设计优化, 在多模型选优的过程中将耗费大量的时间。而第三种深潜救生艇简化方案设置初衷是删减的外部零部件过多, 虽然迎流面积和简化方案 1 区别不大, 压差阻力变化不大。但是由于构件较少, 导致摩擦阻力较少, 故阻力计算虽然耗时较短, 但阻力值较小, 误差较大。

深潜救生艇的轻质外壳可起到导流、减阻的作用。本文采用的深潜救生艇模型未设置轻外壳导流罩, 模型外部构件较多, 形状复杂, 故计算值将略大于实艇阻力值。此外, 由于模型的简化工作需兼顾计算效率和计算成本。第一种简化方案的三维模型在进行阻力仿真计算时, 网格数过多, 造成计算量较大, 计算时间较长。而第三种方案中, 由于模型简化程度较大, 阻力值计算结果将略小于真实值。综合考虑后, 第二种简化方案可作为最终简化模型, 用于深潜救生艇阻力模拟与预报。

3.2 网格数对阻力计算影响

为进一步研究深潜救生艇阻力数值计算方法, 本文分别以 100 万、200 万、300 万、400 万和 500 万的网格数对深潜救生艇的阻力性能进行计算, 对应的基础尺寸分别为 0.15417m、0.11212m、0.09367m、0.08222m、0.07400m, 其中最小的网格尺寸已达到 0.6% 船长, 经计算, 深潜救生艇阻力值随网格数量增加而变大, 当网格数量达到 300 万时, 阻力值的增大趋于平稳, 继续增加网格数对计算结果影响较小^[4]。

图 2 为 100 万和 500 万网格数算例计算后得出的速度场云图和压力场云图对比, 从速度云图可以看出, 艇体尾部的流体

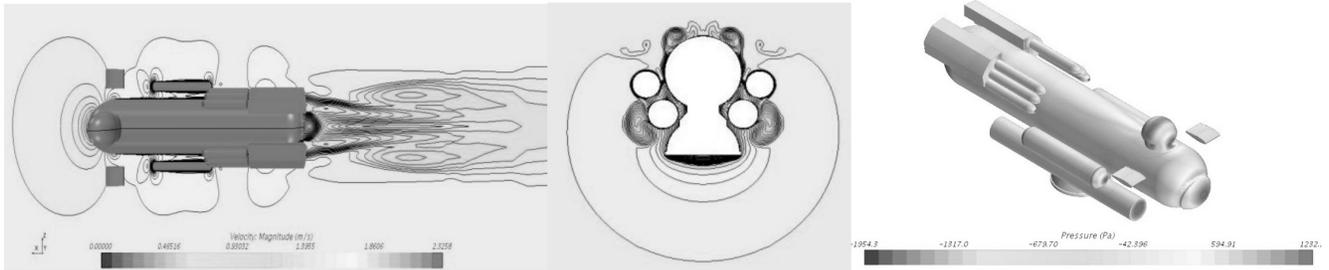


图2 速度场云图与压力场云图

速度最小，从艇首至艇尾流体速度逐渐变化，尾迹捕捉得较好，另外艇体观察窗表面和高压气瓶表面由于流体的直接冲击，流体速度也会急剧变小，但是随着表面的过渡，在球面和柱面的交界处速度会出现一个较大的增长。500万网格数算例绕流场流线更为密集清晰，侧面捕捉到的速度区域比100万网格算例更大，速度梯度更明显，所提供的速度信息更加丰富，综合计算用时和计算精度，本文选择中间的网格方案（300万）来进行阻力计算。

深潜救生艇船迎流处速度场较规律，流线光滑，但在艇侧气瓶和艇体缝隙处流线较为杂乱，在艇体间隙部分出现了流动分离现象。上述缝隙对阻力影响较大，在改型优化设计时，建议在气瓶和相关附体上设置导流轻外壳，减少整艇的间隙流，从而达到减少阻力的效果。

压力分布合理性是判断算例准确度的依据之一，深潜救生艇迎流面由于直接受到水流的冲击，所以受到的压力最大，对于艇体侧面电池舱等迎流面为平面的部位，整个迎流面所受的压力基本相等，而对于像气瓶、转裙等迎流面为曲面的部位，整个迎流面顶部的压力最大，随着曲面向后的延伸，压力逐渐减小，在曲面的边缘处，即球面和柱面的交界处压力达到最大的负值，这是由于流体流经形状凸起的部位时，在该部分上方某处速度会增加，根据伯努利定律，相应压力会降低，图中计算结果符合流动的基本特征。对于艇体的侧面，由于没有直接受到正面来流的冲击，因此所受到的压力没有迎流面的压力大，而且整个艇体侧面所受到的压力基本相等。

3.3 边界层网格对阻力计算影响

对边界层内复杂流动的模拟直接影响水下结构物阻力性能计算结果，本文设置了不同棱柱层网格层数和延伸数的方案来讨论边界层网格设置对阻力计算的影响。首先，固定棱柱层网格延伸数为1.3不变，改变棱柱层数为11、13和15。其次保持棱柱层数13不变，将棱柱层延伸设置修改为1.1、1.3和1.5。在棱柱层网格生成后检查网格质量发现，相比原模型，流体计算软件中几何重构得到的部分小构件或缝隙处边界层网格出现

了少量棱角分明的失真情况，这是由于网格数较少，对细节的捕捉不足。在大折角和小缝隙处，棱柱层有削减的情况，考虑到深潜救生艇服务航速较低，边界层较厚，削减的棱柱层网格将影响计算结果的准确度，这也是模型简化前处理的重要意义之一。

由计算结果可得，在棱柱层延伸数一定时，随着棱柱层数的增加，所计算出的深潜救生艇阻力逐渐增大；在棱柱层数一定时，随着棱柱层延伸数的增大，所计算出的深潜救生艇阻力逐渐减小。但阻力值总体变化不大，说明本文设置的边界层网格满足计算需要。

4 结语

综上所述，本文简化深潜救生艇三维模型，得到三种不同的简化方案，计算并分析了三种方案的计算成本后，确定了能同时满足计算精度和效率的简化模型。

同时，基于此模型，研究了CFD数值计算中影响深潜救生艇阻力计算精度的若干因素，包括流体域的设置、网格划分方案和湍流模型选择，确定了较为合理阻力性能计算方法，本文提出的计算方法可为深潜救生艇研究与制造提供参考。

参考文献：

- [1] 郑冠超. 基于CFD近似模型的水下航行器节能优化研究[D]. 大连：大连海事大学，2017.
- [2] 朱怡. 水下潜器水动力模型简化及参数辨识研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2007.
- [3] 谭浩. 援潜救生艇与失事潜艇对接过程中的水动力干扰研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2019.
- [4] 李佳. 载人潜器阻力性能的数值和试验预报及外形优化研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2010.

作者简介：李岩（1992-），男，山东青岛人，硕士研究生，助理工程师，主要从事防险救生技术研究。