

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.033

水下航行体大攻角航行数值模拟研究

李雨泽¹, 刘旋¹, 鹿高勇², 时绍杰¹

(1. 南京航空航天大学 能源动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 山东农业大学 园艺科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要:水下航行体在大攻角下航行时,传统的湍流模型无法获取令人满意的结果。采用新开发的超大涡模拟方法(VLES),研究 AFF-8 潜艇模型在高雷诺数和不同攻角下的力、流场和桨盘面尾流场的变化,分析大攻角下水下航行体流场特性。研究结果显示:VLES 方法可以准确预测出攻角增大后流场中出现的失速、背流面逆压梯度增加、边界层分离提前、尾迹增厚等现象。

关键词:水下航行体;超大涡模拟;DAPRA SUBOFF;流动分离

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0158-05

Numerical Simulation Research of Undersea Vehicle at Large Angle of Attack

LI Yuze¹, LIU Xuan¹, LU Gaoyong², SHI Shaojie¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: As for the disatisfactory results gained by traditional turbulent flow model in undersea vehicle voyage at large angle of attack, the newly developed very large eddy simulation (VLES) method is used to study the change of the force, flow field and wake flow field of AFF-8 submarine model at high Reynolds and different angles of attack, and analyze flow field features of undersea vehicle at large angle of attack. The research results show that VLES method can accurately predict the phenomenons such as the stalling in the flow field with the increase of angle of attack, reverse pressure gradient increasing on the back flow surface, boundary layer separation advancing and wake thickening.

Keywords: undersea vehicle; VLES; DAPRA SUBOFF; flow separation

0 引言

以潜艇、水下机器人等为代表的水下航行体是人类对海洋、湖泊等水下环境资源进行探索和使用的工具,在国防安全、资源探索、环境监测等科学研究及工程应用方面具有重要的作用。近些年对水下航行体的研究也日益增多^[1-2]。

水下航行体在上浮或者下潜中会出现大攻角航行状态,这个过程的水动力学过程非常复杂,流体流动的物理过程呈现强烈的非线性、多尺度特性。目前的半经验方法或者基于稳态计算的计算流体力学(CFD)方法对航行体的流动结构预测及水动力受力计算精度较差,无法满足未来水下航行体高可靠性、高机动性、高安全性的需求。因此,发展精细的水下航行体流动预测方法及水动力学计算方法对于水下航行体操纵运动预报及安全操控具有重要的意义。

国内外针对水下航行体的水动力计算和预报

研究,大部分采用稳态的雷诺平均方法 RANS。而在大舵角下水下航行体周围的流动分离严重,基于 RANS 方法的流场预测精度较差,从而导致失速角的预报可靠性较差。因此,近些年来,基于精细的湍流模拟方法逐渐被应用到了水下航行体的水动力计算中。BHUSHAN 等^[3]使用 Fluent 比较了 SST-URANS 和混合 RANS/LES 模型(包括 SA- \overline{DDES} 、KW-IDDES 和最近开发的 DHRL 模型)在船舶流体力学应用中的模拟能力。ALIN 等^[4]系统分析了分离涡方法 DES 和大涡模拟方法 LES 在潜艇水动力计算方面的潜力及瓶颈问题。KUMAR 等^[5]利用 LES 模拟方法对 SUBOFF AFF-1 模型的边界层演变过程和尾迹特性进行了详细的讨论。POSA 等^[6]采用 LES 模拟方法着重研究了雷诺数对 SUBOFF AFF-8 模型边界层结构和近尾流结构的影响。针对航行体尾舵、推进器的大涡模拟研究,在近些年公开发表的文献中也越来越多。

第一作者简介:李雨泽(1997—),男,山东青岛人,硕士研究生,研究方向为热负荷与流动分离控制,liusibei@nuaa.edu.cn。

在本研究中,使用美国 DARPA 潜艇模型 SUBOFF 中 AFF-8(全附体)潜艇模型,讨论水下航行体在不同攻角下航行时流场结构的变化。研究中采用有潜力的新型湍流模拟方法之一“超大”涡模拟(“very-large” eddy simulation, VLES)。对于直航情况下,本文将计算结果与实验数据对比,验证计算模型的准确性。对于大攻角流动,对比分析不同模型流场的差异以期得到有效信息,为水下航行体设计提供新的思路。

1 数值方法

1.1 VLES 模型

VLES 方法是一种根据网格分辨率从非定常 RANS 过渡到 LES 并最终接近 DNS 的建模方法。本研究采用了由 HAN 等^[7]提出的新的 VLES 模型。VLES 模型采用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,计算鲁棒性好,形式简单。在现有的 VLES 模型中,所模拟的湍流动能 k 及其耗散率 ε 的输运方程与可实现的 $k-\varepsilon$ 模型完全相同。

$$\frac{d\rho k}{dt} = P_k - \rho\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$\frac{d\rho\varepsilon}{dt} = \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

式中: S 是应变速率的大小, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$; $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$ 。

与 $k-\varepsilon$ 模型相比, VLES $k-\varepsilon$ 模型只修改了湍流黏度的公式,形式为

$$\mu_t = \frac{F_r \rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中 F_r 为分辨率控制函数,其表达式是 VLES 建模的关键问题。

提出的 F_r 的新表达式在文献[4]中给出,即

$$F_r = \min \left\{ 1.0, \left[\frac{1.0 - \exp\left(-\frac{\beta L_c}{L_k}\right)}{1.0 - \exp\left(-\frac{\beta L_i}{L_k}\right)} \right]^n \right\} \quad (4)$$

式中 L_c 、 L_i 和 L_k 分别为截断长度尺度、积分长度尺度和 Kolmogorov 长度尺度,定义为 $L_c = C_x (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{\frac{1}{3}}$, $L_i = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}$, $L_k = \frac{\nu^{\frac{3}{4}}}{\varepsilon^{\frac{1}{4}}}$ 。

式(4)中提出的 F_r 函数形式表明, F_r 的取值根据网格分辨率的不同在 0~1 之间变化,来决定湍

流的模化程度,并可以实现在 RANS ($F_r \rightarrow 1$, $\mu_t \rightarrow \mu_t^{\text{RANS}}$), LES 和 DNS ($F_r \rightarrow 0$, $\mu_t \rightarrow 0$) 的转变。

1.2 模型和数值设置

本研究水下航行体模型选用美国国防先进技术研究署 (defence advanced research project agency, DARPA) 为建立 CFD 分析软件验证数据库而专门设计的 DARPA SUBOFF 标准模型。全附体模型 AFF-8 模型是在水滴形主体的基础上加上由指挥台及 4 个对称尾翼组成的附体,如图 1 所示。



图 1 AFF-8 潜艇模型

AFF-8 模型坐标系和流体域如图 2 所示。其中整体为长 $4L$ 、直径为 $6D$ 包围艇体的圆柱体,与艇体同轴。边界面 I 为计算域进口面,距艇首的距离为 L ; 边界面 O 为计算域出口面,距艇尾的距离为 $2L$; 圆柱外表面一分为二,上表面表示为 T 面,下表面表示为 B 面,潜艇表面表示为 S 面。

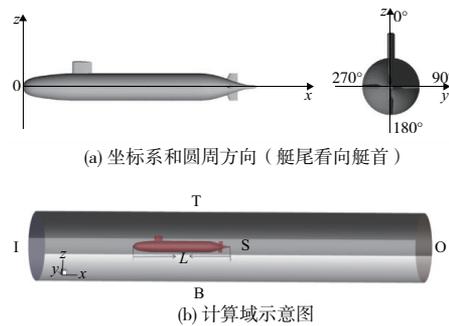


图 2 AFF-8 模型坐标系和流体域

AFF-8 全附体模型的网格具体划分如图 3 所示。全域采用结构化网格,数量 700 万。同样地,艇身外表面由 O 型 Block 包裹,对 O 型 Block 内部节点加密便于捕捉更多流动细节。指挥台围壳的网格划分进行特殊处理。围壳整体用 O 型 Block 包裹,对围壳前缘再次使用 O 型 Block 分块,后缘为尖端,采用 Y 型 Block 分块。舵的网格划分和指挥台相同,并且都进行局部加密,以保证流体在经过特殊结构后的流动特性可以被准确捕捉到。

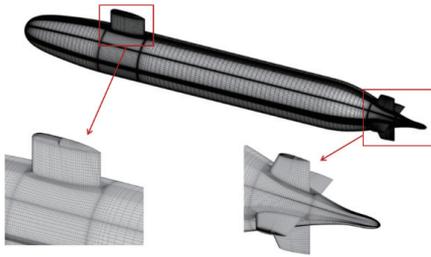


图3 网格划分示意图

2 模型验证

为了进一步验证 VLES 模型的适用性及准确性,本文将 AFF-1 和 AFF-8 在雷诺数为 1.2×10^7 下的直航模拟结果与相关实验数据和模拟结果对比如图 4 所示。

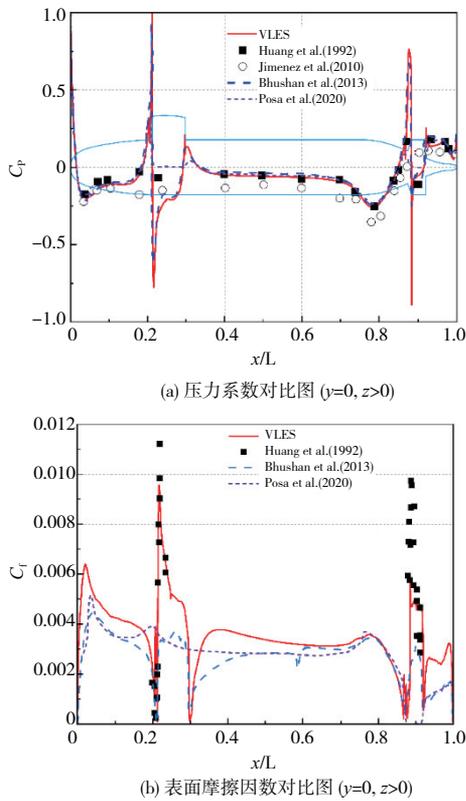


图4 AFF-8 沿艇身压力和表面摩擦力模拟结果和实验数据对比图

图 4(a) 中将艇体 ($y = 0, z > 0$) 表面压力系数 C_p 计算结果与两组实验数据进行了比较。实验数据选择 HUANG 等^[8] 的结果,即从 SUBOFF 系列模型的实验得到的压力、速度和表面摩擦力等详细数据。作为对比,图中同样展示了分别使用 URANS 和 LES 模型的模拟结果。VLES 模型显示出不错的模拟能力,很好地模拟出 C_p 的变化趋势。整个分布曲线过渡光滑,与实验数据吻合良好。

在 POSA 和 BHUSHAN 的研究中也观察到了同样的趋势。

图 4(b) 将艇体 ($y = 0, z > 0$) 表面摩擦因数 C_f 模拟结果与实验数据进行比较,吻合度良好。在图中,模拟结果和实验数据的 C_f 值在指挥台和舵舵的前缘显示出尖峰,因为流速差的存在,指挥台上的值更高。观察到船尾的 C_f 逐渐下降,这是由于船体逐渐变细引起的流体速度减小。BHUSHAN 和 POSA 的模拟结果同样展示在图中。

由图 4 可以看出 VLES 模型对潜艇附体部分的流动处理得更好,结果与实验数据更吻合,精度有一定程度的提高。

3 结果分析

上浮和下潜作为水下航行体常见的航行模式之一,其特点需要水下航行体在大攻角下完成稳定运动。但大攻角航行会使水下航行体周围的流场产生剧烈变化,甚至在局部出现流动分离现象,导致机动性恶化。本文分别模拟 AFF-8 潜艇模型在 α 为 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 和 60° 这 4 种攻角下的流动,研究攻角变化对水下航行体运动的影响。

图 5 展示了 AFF-8 模型的升、阻力系数随攻角变化的情况。 $0^\circ \sim 40^\circ$ 攻角增大时,升力逐渐增加;在 40° 攻角附近达到最大值,之后出现失速现象。阻力系数则是一直在增大, $0^\circ \sim 20^\circ$ 攻角时增长趋势缓慢; $20^\circ \sim 60^\circ$ 攻角时增长速度变快。

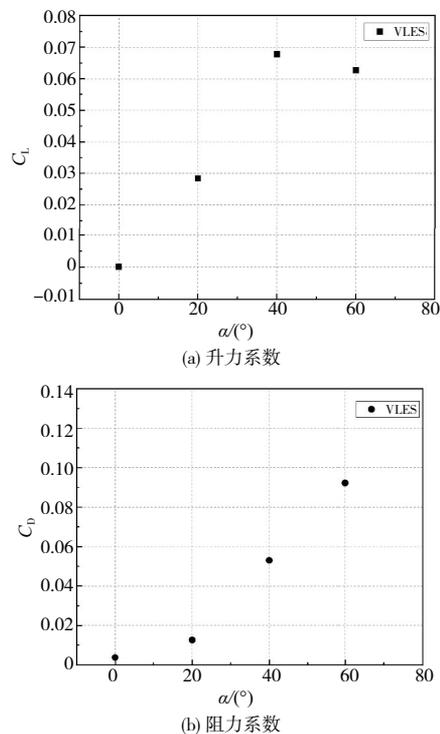


图5 AFF-8 模型不同攻角下升力系数和阻力系数

为了进一步分析攻角对水下航行体附近流场的影响。将流体域中两个截面($y=0, z=0$)的流场压力分布展示在图 6 中。从图中可以观察到, $z=0$ 截面的流场变化较为简单, 从 0° 攻角增长至 60° 攻角, AFF-8 潜艇附近的低压区域增大, 以艇身为中心向外扩大, 慢慢将潜艇包围。 $y=0$ 截面的流场压力变化相对复杂。

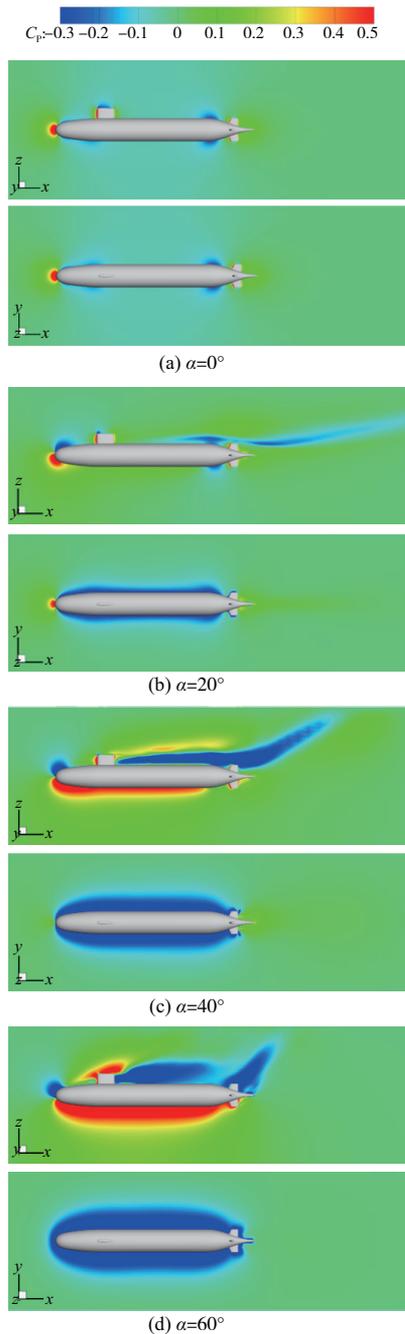


图 6 AFF-8 模型不同攻角下流场压力分布 (上为 $y=0$ 截面, 下为 $z=0$ 截面)

从 6 图中还可以清楚地看到, 随着攻角的增大, 艇艏前方区域的高压区沿迎流面向后发展, 并且呈现扩大的趋势, 一直发展到潜艇尾部。除此

之外, 在 20° 攻角以后, 指挥台后方偏上也出现明显的高压区域。随着攻角增大, 高压区域向艇艏移动。值得注意的是, 此高压区的后方总是伴随一片低压区的发展。在 20° 攻角时, 潜艇平行中体后端出现丝带状的低压区。在 20° 攻角之后, 随着攻角的增大, 丝带状的逆压梯度区逐渐扩大并向艇身背流面发展, 逆压梯度的存在, 使得在潜艇背流面形成大的逆压梯度区, 进一步增加压差阻力以及加剧边界层分离, 恶化潜艇的机动性, 让潜艇背流面的流动更加复杂。

图 7 展示的 AFF-8 模型表面的极限流线, 可以探究攻角如何影响潜艇边界层的分离。 0° 攻角时, 边界层分离起始于指挥台两侧, 直到尾舵附近的分离螺旋点结束。 20° 攻角时, 分离起始和结束与 0° 攻角相同; 不同的是, 攻角达到 20° 时, 艇身的主分离线附近出现了 2 次分离线。这是由于攻角增大, 潜艇背流面的逆压梯度增加, 指挥台后的涡流速度增加, 壁面附近产生 2 次涡流, 进而造成了 2 次分离的产生。在攻角达到 40° 时, 潜艇边界层分离的位置发生了变化, 分离位置向前移动。从图 7 中可以看到, 在艇艏附近流场出现低压区, 附近存在较强的逆压梯度, 这就导致边界层在此处就开始发生分离, 并在绕流过指挥台后发生了 3 次分离, 直到尾舵附近的分离螺旋点结束。 3 次分离线的存在也说明流动在壁面附近产生了 3 次涡。攻角达到 60° 后, 逆压梯度增大, 分离进一步加剧, 潜艇边界层分离位置继续向前移动, 2 次分离、3 次分离也更早地产生, 尾舵附近的分离螺旋点强度也进一步增大。

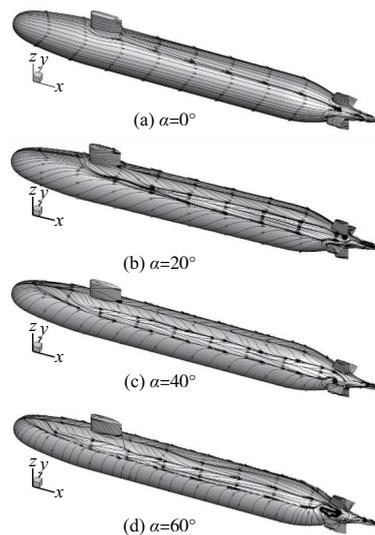


图 7 AFF-8 模型不同攻角下极限流线分布

图 8 展示了 AFF-8 模型流场 $y=0$ 截面附近的速度云图以及流线分布, 图中还展示了指挥台和舵舵附近的局部放大图。

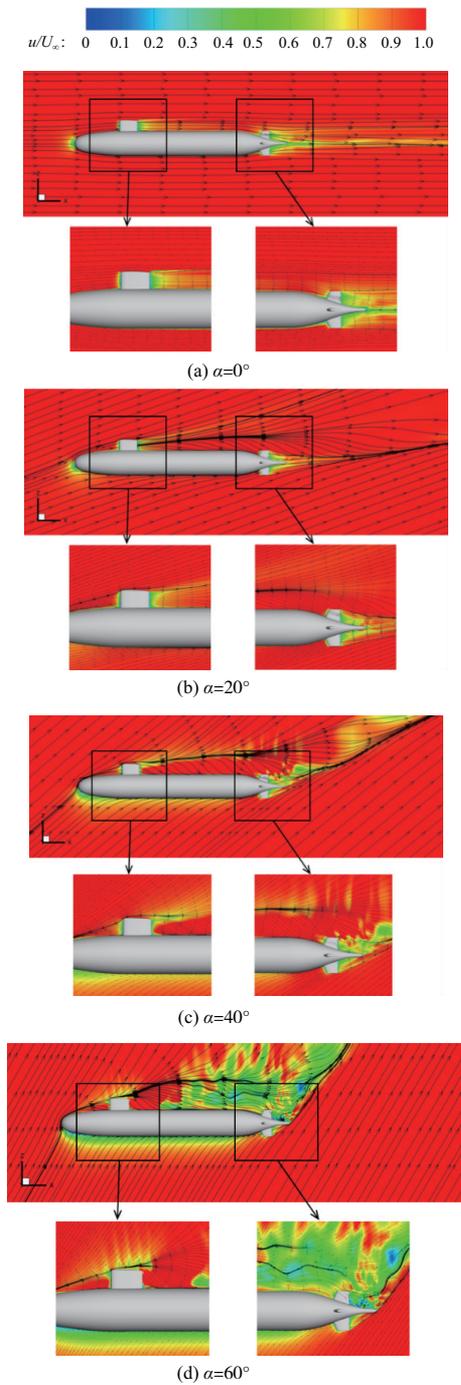


图 8 AFF-8 模型不同攻角下瞬时速度及流线分布 ($y=0$ 截面)

从图 8 中的速度分布可以看出, 指挥台后产生较大的尾迹区域, 尾迹区域内显示出速度亏损。指挥台后的尾迹流向艇体后部, 与舵舵的尾迹相结合, 造成艇体尾部更大区域的速度亏损, 从而使得整个潜艇的尾迹变厚, 流动不稳定性增加。随

着攻角的增大, 指挥台后的速度亏损加大, 尾迹变厚。但值得注意的是并不是指挥台后的所有区域都存在速度亏损。在图中可以看到在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 攻角之间, 指挥台前后有区域未发生速度亏损, 而且区域内的流线弯曲。这是由于在指挥台附近存在马蹄涡, 涡产生较大的切向速度, 对周围的流体产生卷吸作用。图中的速度流线可以反映这种卷吸作用的存在。

4 结语

本文提出一种新型的湍流模拟方法——超大涡模拟 (VLES)。VLES 可以在节省计算资源的同时, 准确地模拟预测水下航行体的流场特征。水下航行体在大攻角航行时, 会出现失速现象, 阻力迅速增加; 背流面逆压梯度增加, 流动恶化, 边界层分离提前; 指挥台、尾舵速度亏损加大, 尾迹增厚。

参考文献:

- [1] 陈纪军, 潘子英, 郑文涛, 等. X 形舵水下航行体姿态角对舵水动力特性的影响 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 99-106.
- [2] LUNGU A. A DES-based study of the flow around the self-propelled DARPA SUBOFF working in deep immersion and beneath the free-surface [J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110358.
- [3] BHUSHAN S, ALAM M F, WALTERS D K. Evaluation of hybrid RANS/LES models for prediction of flow around surface combatant and SUBOFF geometries [J]. Computers & Fluids, 2013, 88: 834-849.
- [4] ALIN N, BENSOW R E, FUREBY C, et al. Current capabilities of DES and LES for submarines at straight course [J]. Journal of Ship Research, 2010, 54(3): 184-196.
- [5] KUMAR P, MAHESH K. Large-eddy simulation of flow over an axisymmetric body of revolution [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018, 853: 537-563.
- [6] POSA A, BALARAS E. A numerical investigation about the effects of Reynolds number on the flow around an appended axisymmetric body of revolution [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 884: A41.
- [7] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. An efficient very large eddy simulation model for simulation of turbulent flow [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2013, 71(11): 1341-1360.
- [8] HUANG T T, LIU H L. Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel: the DARPA SUBOFF experimental program [C] // 19th Symposium on Naval Hydrodynamics [S.I.: s.n.], 1992: 312-346.

收稿日期: 2023-03-08