

文章编号: 1007-7294(2024)04-0485-16

基于重叠网格的潜艇自航模 操纵运动数值模拟研究

陈默, 张楠, 陈纪军, 黄苗苗, 曾柯
(中国船舶科学研究中心, 江苏无锡 214082)

摘要: 针对潜艇机动状态非定常运动数值模拟方法提升的实际需求, 本文采用基于重叠网格的方法对潜艇六自由度耦合运动及各操纵面的独立运动直接数值建模, 并利用滑移网格技术直接模拟艇后螺旋桨的转动, 进行潜艇水下自航模的数值模拟方法研究。通过开展潜艇自航模水下直航、水下回转、水平面Z形操舵、紧急倒车等典型工况的数值模拟, 重点解决潜艇操纵状态下艇/桨/舵水动力耦合建模、自动舵的PD(proportional-derivative)数值控制实现等问题, 建立基于重叠网格的潜艇自航模数值模拟技术途径。同时对潜艇操纵状态下艇体周围流动现象以及运动学与动力学参数时历变化过程进行分析, 通过将典型运动参数数值模拟结果与水池物理模型试验结果进行对比, 验证其工程预报实用性。研究结果可为潜艇操纵性和适航性预报与评估以及潜艇自航模模型试验技术完善提供技术支撑。

关键词: 潜艇; 自航模; 重叠网格; 数值模拟

中图分类号: U661.43 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.04.002

Numerical research on free running model maneuvering motion of a generic submarine based on overset mesh

CHEN Mo, ZHANG Nan, CHEN Ji-jun, HUANG Miao-miao, ZENG Ke
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Aiming at the actual demand of improving the numerical simulation of unsteady submarine motion in maneuvering condition, the overset mesh was used to directly model six degree of freedom coupling motion of a submarine and the independent motion of each control surface, and the sliding mesh was used to directly simulate the propeller rotation at the stern of a submarine, so as to carry out the research on the numerical simulation of a generic submarine in self-propulsion and free running maneuvering conditions. Through the procedure of numerical simulation in typical working conditions, such as submerged self-propulsion, turning maneuver, zigzag maneuver, crashback, etc., the issues of submarine/propeller/rudder hydrodynamic coupling modeling and PD (proportional-derivative) numerical control realization of autopilot in maneuvering condition were emphatically solved, and the technology of free running submarine model numerical simulation based on overset mesh was established. At the same time, the surrounding flow phenomenon and the time-history change process of kinematics and dynamics parameters of the submarine in maneuvering condition were analyzed. By comparing the numerical simulation results of typical dynamics parameters with the model test results, the practicability of the approach for engineering prediction was verified. The research can provide a guidance for the prediction and evaluation of submarine maneuverability and seaworthiness. It is

收稿日期: 2023-10-14

基金项目: 装备预研共用技术项目(50907010101)

作者简介: 陈默(1994-), 男, 硕士, 工程师, E-mail: heu_chenmo@163.com;

张楠(1977-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 通讯作者, E-mail: zn_nan@sina.com。

beneficial for the improvement of free running submarine model tests.

Key words: submarine; free running model; overset mesh; numerical simulation

0 引 言

潜艇自航模研究是直接检验潜艇水动力综合性能的有效途径,一直是国际水动力学领域的研究热点^[1]。早期的研究工作主要集中在潜艇自航模试验上,中国船舶科学研究中心潜艇自航模试验团队在此方面做过大量的研究性工作,内容涵盖水面、水下和近水面等多种运动状态。在这里需要说明的是快速性领域中自航试验的“自航”,英文为“self-propulsion”;而操纵性领域自航模试验的“自航”,英文为“free-running”,二者含义是有所区别的。

1992年,冯学知等^[2-3]进行了潜艇波浪中近水面自航模试验研究,并首次在试验环境条件下发现带导弹舱盖潜艇在近水面航行时会发生规律性的“露背”现象,潜艇越靠近水面,波高越高,“露背”现象越明显,且显现程度与浪向角有关。

1994年,甘品章等^[4-5]进行了潜艇自航模水面操纵性试验研究,内容包括水面回转试验、回舵试验、水面Z形操舵试验、制动试验、倒航试验及航向保持试验。随后于1995年进行了潜艇自航模水下操纵性试验研究,内容包括水下回转试验、水平面Z形操舵试验、回舵试验、定深定向航行试验、升速试验及超越试验。在此基础上,于1999年先后进行了潜艇水面、水下和近水面及波浪下操纵性自航模试验研究,内容涵盖不同航速和不同浸深下静水面及波浪中的近水面定深定向直航运动。

近年来,由于计算流体力学领域数值方法的持续改进、高性能软件不断优化以及硬件设施条件的逐渐完备,潜艇自航模CFD数值模拟技术随之得以完善并被广泛应用。一方面,能有效避免自航模试验周期长、资源耗费大的缺点;另一方面,能精确提供潜艇控制航行过程中的周围流场信息,为分析潜艇运动姿态及轨迹特征做辅助参考^[6]。

早期自航模CFD数值模拟工作主要是耦合螺旋桨及其他运动附体的动力学解析数据,来支撑潜艇模型运动的CFD求解,如采用体积力法或势流求解技术实时计算螺旋桨产生的推力,作为潜艇模型运动CFD计算求解的输入。2009年,Bettle等^[7]采用体积力法替代螺旋桨和各运动附体的水动力建模,并通过改变模型重量和重心位置模拟压载水舱的注水和排水过程,研究了DRDC潜艇在水面自航模运动过程中的横滚现象;2010年,Dreyer和Boger^[8]同样采用体积力法替代螺旋桨研究了水面船与潜艇的耦合运动,并通过操纵面偏移来控制潜艇运动姿态和航行深度。

2013年,爱荷华大学的Chase等^[9-10]采用两种技术手段来模拟DARPA SUBOFF潜艇匹配INSEAN E1619螺旋桨的自航模运动:一种是采用势流求解代码计算螺旋桨推力和扭矩来作为CFD运动求解的输入;另一种是在CFD求解代码中直接模拟螺旋桨的转动,两种方法在模拟潜艇的水平面Z形操舵试验中展现出了相似的求解结果。2014年,Kim等^[11]分别采用虚拟盘替代螺旋桨和滑移网格技术直接模拟螺旋桨的转动,对DARPA SUBOFF潜艇匹配INSEAN E1619螺旋桨的水下回转运动进行了数值模拟研究,研究表明,直接模拟螺旋桨转动时螺旋桨的侧向力对艇体产生的转舵力矩会改变潜艇的动态回转过程,最终导致回转半径计算结果和利用虚拟盘替代螺旋桨的计算结果之间存在约10%的偏差。

相对于耦合螺旋桨或其他附体的解析数据,CFD直接求解全附体潜艇模型运动时尾流分辨率较高,能较为精准地捕捉螺旋桨叶片旋转产生的三维涡旋结构流场特性和动力学特性,缺点是计算资源耗费较大,在大规模模拟计算之前需充分做好网格和时间步长的验证工作。

在潜艇自航模运动CFD数值模拟领域,爱荷华大学的研究工作一直走在各项技术发展的最前沿。2015年,Martin^[12]采用重叠网格技术实现潜艇及各附体的独立运动,并通过PI控制器实时控制螺旋桨的转速以使艇体到达预定航速,对全附体ONR Body 1潜艇模型匹配Mercury Vengeance螺旋桨水下自

航模运动进行了数值模拟研究,内容包括水下直航、水平面Z形操舵和高速回转运动等。

由于缺乏公开的试验数据对潜艇自航模CFD求解结果进行验证,2015年,Overpelt等^[13]对Joubert BB2潜艇模型操纵面进行改进,并匹配MARIN 7371螺旋桨在MARIN水池中进行了一系列潜艇自航模基准校验试验,内容包括水下直航、回转运动、水平面Z形操舵、上浮制动以及近水面直航等,以资自航模CFD数值模拟验证使用。

随后,爱荷华大学的Carrica等^[14-16]利用CFD数值模拟技术还原了部分试验过程,且各项运动学参数均吻合较好。在此基础上,Carrica进一步对该潜艇模型在静水和波浪中的近水面自航模运动进行了研究。在采用PD控制器实时控制舵舵和舵操纵面的舵角偏转、PI控制器实时控制螺旋桨的转速原有技术上,引入积分分量,即利用PID控制器实现对舵角和螺旋桨转速的实时控制,同时通过PID控制器实时调控潜艇运动过程中的质量和重心纵向位置来模拟压载水舱,实现定深和纵倾控制,避免仅利用操纵面偏移来调整垂向姿态所产生的延迟效应和导致航行阻力增加的缺陷。

2020年,Kim等^[17]利用滑移网格技术和PID控制器,分别对Joubert BB2潜艇缩尺和实尺度模型定桨速及定航速垂直面Z形操舵进行了数值模拟,并基于网格加细比 $r_c = \sqrt{2}$ 对数值计算结果进行空间尺度上的不确定度分析,对比物理模型试验结果完成确认工作。随后采用虚拟盘替代螺旋桨对六级海况环境下不同航速的潜艇近水面回转运动进行了数值模拟,结果表明,在该海况下潜艇低速航行时操纵面控制性能急剧退化,控制权重衰减率与航速的平方成正比。

国内在潜艇自航模数值模拟相关领域的研究起步相对较晚,但在潜艇六自由度操纵运动和艇桨耦合水动力数值计算等方向已有不少的研究成果。2015年,廖欢欢等^[18]基于重叠网格技术对一定潜深下潜艇应急上浮过程中的六自由度运动姿态进行了数值模拟分析;2017年,周广礼等^[19]采用全域网格技术对SUBOFF潜艇的应急上浮过程进行了数值模拟,获得了艇体六自由度运动时历参数及流场细节信息;2021年,张楠等^[20]基于LES方法结合滑移网格技术计算了SUBOFF潜艇带AU5-65螺旋桨自航工况水动力,获得了实效伴流分数、推力减额与相对旋转效率等自航因子,分析了螺旋桨在艇后旋转时的涡旋结构,并将敞水与自航水动力计算结果与试验结果进行了对比分析,验证了流动计算方法的可靠性;2022年,汪训铭等^[21]利用LES方法对带有AU5-65桨的SUBOFF潜艇正车前进与紧急倒车工况的流场与水动力进行数值计算研究。计算得到的尾翼马蹄涡、桨叶梢涡与毂涡等流动精细结构符合实际流动情况,计算捕捉到的大尺度涡环结构以及复杂的非定常尾流等紧急倒车工况下的流动现象也符合常规认识。

到目前为止,虽然国内外潜艇自航模CFD数值模拟技术的发展已广泛开展,但真正实现起来仍存在较大难度,比如时间步长和网格划分方案的选取与验证,潜艇模型艇体、螺旋桨和各操纵面独立与耦合运动的实现,潜艇航速与螺旋桨转速之间的匹配关系和高精度的自动舵PD数值控制实现等。潜艇自航模的CFD数值模拟不仅要实现螺旋桨在高速转动的同时实时匹配艇体的六自由度运动,跟随艇体一起发生姿态变化,而且要考验自动舵数值实现环节,操纵面偏移的同时各个舵亦需跟随艇体一起发生姿态变化。有鉴于此,本论文将逐一解决各项技术难点,研究并建立完整的潜艇自航模CFD数值模拟方法,在此基础上进一步研究潜艇自航模水下直航、水下回转、水平面Z形操舵、紧急倒车等典型工况下的运动学和动力学特性,为潜艇操纵性和适航性预报与评估以及潜艇自航模模型试验技术完善提供技术支撑。

1 研究对象

本文选用Joubert BB2潜艇模型匹配INSEAN E1619螺旋桨进行自航模CFD数值模拟方法研究工作,缩尺比为1:18.348,模型主要参数和几何外形分别见表1和图1。

表1 BB2潜艇模型主要参数
Tab.1 Main particulars of BB2

参数	符号/单位	实艇	模型 (1:18.348)	参数	符号/单位	实艇	模型 (1:18.348)
型长	L/m	70.2	3.8260	重心纵向位置 (距中心线)	z_c/m	0.0443	0.0024
艇宽	B/m	9.6	0.5232	横摇惯性半径	I_{xx}/m	3.433	0.1871
中心线高	H/m	5.3	0.2889	纵摇惯性半径	I_{yy}/m	17.6	0.9592
排水体积	∇/t	4440	0.7012	艏摇惯性半径	I_{zz}/m	17.522	0.9550
重心纵向位置 (距艏)	x_c/m	32.31	1.7610				

Joubert BB2为现代通用型常规潜艇,由澳大利亚学者Joubert^[22-23]设计,经Overpelt等^[13]改进操纵面后,匹配MARIN 7371螺旋桨在MARIN水池中进行了一系列潜艇自航模基准校验试验,图2为BB2潜艇模型自航模试验照片^[13]。本文即采用该自航模试验数据对本文的数值模拟方法进行检验。INSEAN E1619螺旋桨为七叶大侧斜桨,是意大利INSEAN水池系列螺旋桨桨模之一,原始直径 $D=0.485$ m,为匹配Joubert BB2潜艇模型尾椎段外形,同时尽量减少螺旋桨的尺寸差异对艇体水动力性能的影响,本文对其进行缩尺处理,缩尺后桨直径 $D_m=0.273$ m(与MARIN 7371螺旋桨缩尺直径一致)。需要说明的是,与快速性试验不同,在潜艇操纵性试验中常采用代用桨的方法,只要螺旋桨直径与原桨相同即可,因为主要关注的是水动力,这是一种常规方法,因此MARIN水池中Joubert BB2匹配MARIN 7371螺旋桨的试验数据能够用来验证本文的数值计算方法。

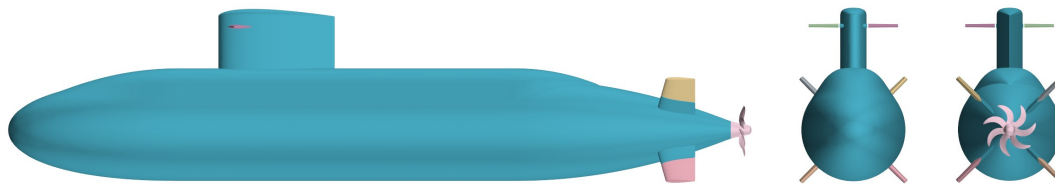


图1 BB2潜艇模型

Fig.1 Joubert BB2 geometry



图2 BB2潜艇模型自航模试验

Fig.2 Free running tests of BB2 submarine model

2 数值计算方法

2.1 湍流模型与区域划分

本文采用商用软件Star CCM+进行计算,自动舵控制采用自编程序实现。控制方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \tag{2}$$

式中, \bar{u}_i 是雷诺平均速度分量, u_i 是脉动速度分量, 脉动速度相关项 $-\rho \overline{u_i u_j}$ 称作雷诺应力。

本文在前期研究的基础上采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 湍流动能 k 和耗散率 ε 方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{4}$$

式中, $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3, G_k, G_b$ 为湍流动能生成项, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 表示湍流 Prandtl 数, S_k, S_ε 为源项^[24]。

控制方程采用有限体积法离散, 动量方程中的对流项采用二阶迎风差分格式, 扩散项采用中心差分格式, 湍流模型方程采用二阶迎风差分格式, 时间项采用二阶隐式格式, 压力速度耦合方法选用流场计算中经典的 SIMPLE 算法, SIMPLE 算法 (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 是求解压力耦合方程的半隐式方法。

采用 CFD 直接求解全附体潜艇模型运动的方法, 利用滑移网格技术模拟螺旋桨的转动, 螺旋桨转动域与外流场直接通过滑移交界面实现区域间流场数据信息的交换, 滑移网格技术示意图如图 3 所示。

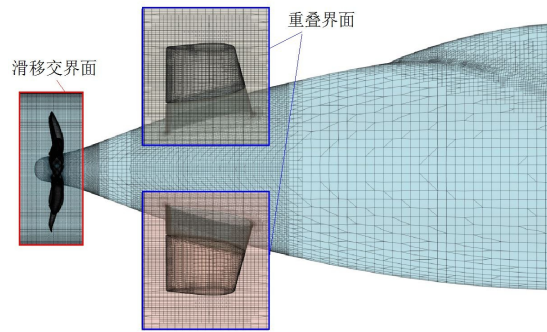


图3 滑移网格技术示意图

Fig.3 Sketch map of sliding mesh method

采用重叠网格技术实现艇体六自由度运动, 建立艇体周围重叠网格区域。重叠区域通过 DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction) 旋转和平移技术随艇体一起进行六自由度运动, 其与外流场之间的数据信息交换通过重叠网格界面采用加权距离插值算法来实现。同理, 舵操纵面和围壳舵独立操舵运动采用嵌套重叠网格技术, 在原有随体 DFBI 旋转和平移运动基础上叠加旋转运动来实现舵的偏转, 各个舵所在嵌套重叠区域与主艇体周围重叠区域以及外流场之间数据信息交换同样是在重叠网格界面上进行。多块重叠区域划分策略如图 4 所示, 流场域被划分为 9 大区域: 螺旋桨滑移网格区域 (Region_Propeller)、艇体重叠区域 (Region_Submarine)、围壳舵嵌套重叠区域 (Region_PtSail、Region_SbSail)、舵操纵面嵌套重叠区域 (Region_PtUp、Region_PtDn、Region_SbUp、Region_SbDn) 和外流场计算域 (Region_Computation)。

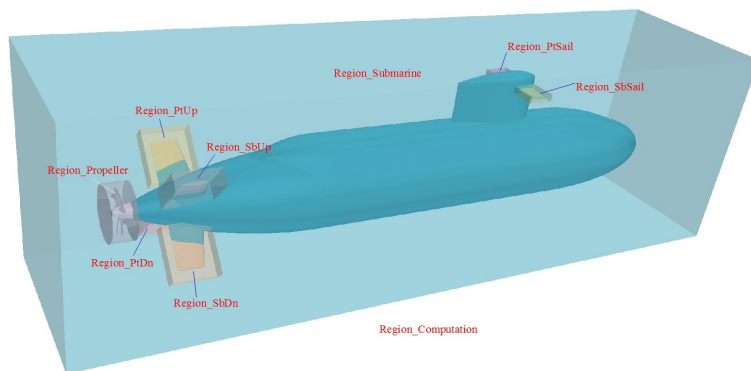


图4 多块重叠区域划分策略

Fig.4 Division strategy of multi-block overset mesh

2.2 自动舵控制

对于舰操纵面和围壳舵舵角及打舵速率的自动实时控制是确保潜艇模型按正确姿态运动的关键,因此自动舵控制策略的选取尤为重要。本文选用PD控制器来对艇体水平和垂向运动姿态的偏差进行校正,通过实时监测艇体六自由度运动状态施加艇体水平和垂向闭环控制,具体表达式如下:

$$\Omega_{\xi,\gamma} = P_{\xi} e_{\gamma} + D_{\xi} \frac{de_{\gamma}}{dt} \quad (5)$$

式中, ξ 为实际施加的控制要素(水平控制、垂直控制及质量控制等), $e_{\gamma} = \gamma_t - \gamma$,表示艇体运动姿态 γ (横荡 y 、艏摇 ψ 、升沉 z 和纵摇 θ)瞬态值与各自目标值之间的差值。比例控制参数 P 和微分控制参数 D 的选取与调整借鉴了以往数值计算研究与模型试验的经验。

潜艇水平控制 δ_H 和垂向控制 δ_V 可分别表示为

$$\delta_H = \Omega_{H,y} + \Omega_{H,\psi} \quad (6)$$

$$\delta_V = \Omega_{V,z} + \Omega_{V,\theta} \quad (7)$$

围壳舵控制 δ_b 和舰操纵面控制(左上舵 δ_{pUp} 、左下舵 δ_{pDn} 、右上舵 δ_{sbUp} 和右下舵 δ_{sbDn})由水平控制 δ_H 和垂向控制 δ_V 的求解结果所决定,即

$$\delta_b = \delta_V \quad (8)$$

$$\delta_{pUp} = \delta_V + \delta_H, \delta_{pDn} = \delta_V - \delta_H, \delta_{sbUp} = -\delta_V + \delta_H, \delta_{sbDn} = -\delta_V - \delta_H \quad (9)$$

与MARIN水池自航模试验保持一致,最大舵角不超过 30° ,实尺度下最大打舵速率不超过 $7.11\%/s$ (对应模型尺度下不超过 $30.4\%/s$)。

当艇体初始重力和浮力相差较大时,垂向位移过大会导致垂向控制 δ_V 失真,仅靠围壳舵和舰操纵面PD控制无法完全抵消掉重浮力偏差,且为维持定深状态而增大舵角时会进一步带来纵倾的持续恶化,因此本文在原有垂向控制 δ_V 的基础上,进一步模拟压载水舱注水和排水过程,采用PD控制器不断调控艇体质量 m ,以实现定深控制。质量控制 δ_m 可表示为

$$\delta_m = PD_{m,z} \quad (10)$$

2.3 时间步长选取

考虑到螺旋桨的高速旋转运动带来的流场涡旋结构和叶片动力学特性的非定常瞬态剧烈变化以及螺旋桨推力的精确预报,在进行潜艇自航模数值模拟之前需做时间步长验证工作。本文选用INSEAN E1619螺旋桨敞水性能数据模拟结果与INSEAN水池试验结果进行对比,来对选用的时间步长进行验证。

设定与试验一致的转速和航速进行螺旋桨水动力数值模拟,利用滑移网格方法使螺旋桨以转速 n 旋转,改变来流水速 V ,从而计算多个进速系数 J 下的螺旋桨推力 T 、转矩 Q 。推力系数 K_T 、扭矩系数 K_Q 及敞水效率 η_0 的定义如下:

$$J = \frac{V}{nD}, K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \eta_0 = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \quad (11)$$

式中, D 为螺旋桨直径, ρ 为流体介质密度。

非定常计算分别设定为使螺旋桨在每个时间步内旋转 5° 和 20° 的时间步长 Δt ,即 $\Delta t = \frac{1}{72n}$ 和 $\Delta t = \frac{1}{18n}$ (n 的单位为r/s)。各算例网格单元数量约为312.2万,采用壁面函数对无滑移壁面边界层进行处理, y^+ 取为40。

敞水水动力的数值模拟结果见图5,表面压力分布见图6。

由图5敞水水动力曲线对比结果可知,时间步长 $\Delta t = \frac{1}{72n}$ 和 $\Delta t = \frac{1}{18n}$ 的计算结果几乎完全一致。 K_T 和 K_Q 计算值在进速系数较低时略小于试验值,随着进速系数的增大,两者逐渐趋于一致, η_0 的计算值与试验值也基本吻合。与试验结果相比,不同进速系数下推力系数计算偏差为 $-11.7\% \sim -5.0\%$,扭

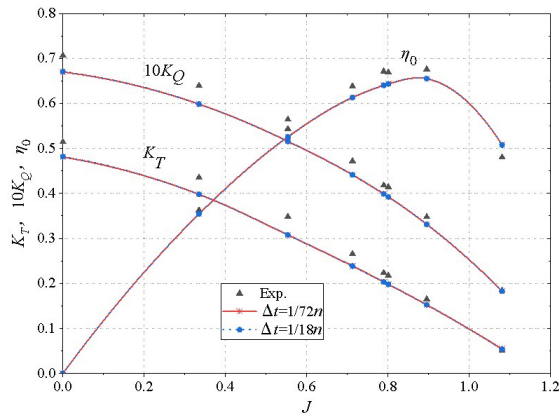


图5 敞水工况水动力计算结果

Fig.5 Computed hydrodynamic forces in open water condition

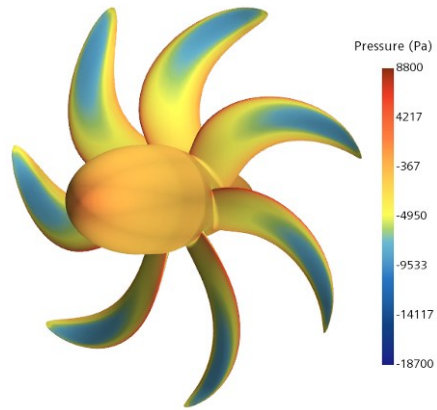


图6 INSEAN E1619表面压力分布

Fig. 6 Distribution of pressure on the surface of INSEAN E1619

矩系数计算偏差为-5.7%~-2.3%，敞水效率的计算偏差为-8.7%~-0.6%，基本满足工程预报需求。考虑到计算硬件资源的限制，后续潜艇自航模的数值模拟均采用 $\Delta t = \frac{1}{18n}$ 。

2.4 网格划分方案

本文将时间步长和网格数量作为影响数值求解结果的两个独立变量，在时间步长无关性验证满足的基础上，进一步开展网格收敛性验证工作，以保证数值计算的可靠性。选取三套网格划分方案（398万、863万、2150万），依照第22届ITTC推荐规程7.5-03-01-02，网格三向加细比均为 $\sqrt{2}$ ，不同数量网格第一层高度相同， y^+ 均为40。

为更精确地在滑移网格区域和外流场、各附体重叠网格区域和艇体重叠网格区域、各附体重叠网格区域和外流场、艇体重叠网格区域和外流场之间进行流场信息交换，在背景流场域或主艇体重叠网格区域中建立局部体网格控制块，对滑移网格区域或嵌套重叠网格区域周围网格尺寸进行控制，以确保各交界面两侧的网格尺寸相近甚至一致，具体的多块区域网格划分方案见表2，模型表面网格和整体计算域网格分布如图7和图8所示。

表2 多块区域网格划分方案

Tab.2 Multi-block region mesh generation scheme

区 域	体网格数量(万)			网格单元类型
	G1	G2	G3	
Region_Computation	224.18	598.95	1758.74	切割体网格单元
Region_Submarine	36.56	55.65	89.00	
Region_PtSail、Region_SbSail	4.43	6.67	7.65	切割体网格单元
Region_PtUp、Region_PtDn	7.54	10.09	13.61	棱柱层网格单元
Region_SbUp、Region_SbDn				
Region_Propeller	97.99	155.07	232.23	
合 计	397.76	863.35	2149.68	

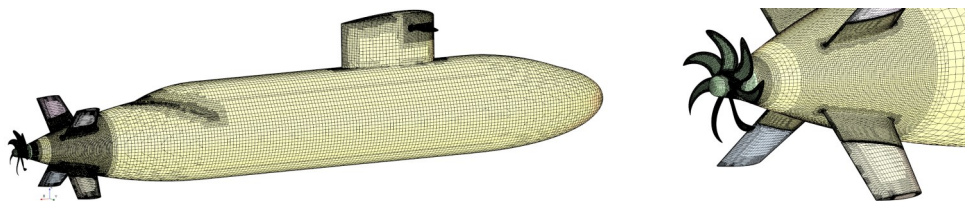


图7 模型表面网格

Fig.7 Model surface mesh

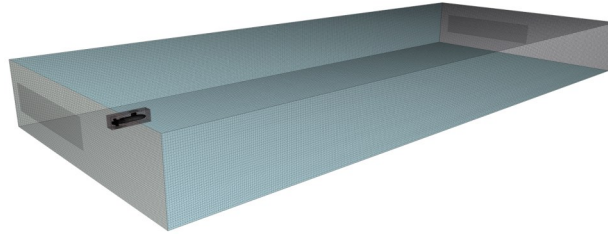


图8 计算区域网格划分

Fig.8 Grid generation of computing domain

首先基于拖曳水池拘束模强迫自航法进行了自航点的计算研究,以辅助自航模的计算分析,航速 $V_e=1.2\text{ m/s}$ 对应螺旋桨转速 $n=4.6\text{ r/s}$ 。选用自航模水下直航工况进行网格收敛性验证工作,额定航速 $V_e=1.2\text{ m/s}$ (对应实尺度航速 10 kn),采用定桨转速方法,即潜艇模型运动过程中螺旋桨转速恒定不变。

图9表示不同网格方案下潜艇轴向速度 V 和轴向位移 x 时历变化对比结果。从图中可以看出,网格 G2 和 G3 对应的轴向速度和轴向位移时历计算结果较为接近,且与网格方案 G1 的计算结果之间存在一定的偏差。可近似等效认为,在网格方案 G2 的基础上继续增大网格数量对自航模数值求解结果影响很小。综合计算精度和计算资源考虑,网格方案 G2 较为适合本文的计算需求,下文各工况自航模数值模拟网格划分方案均选用 G2。

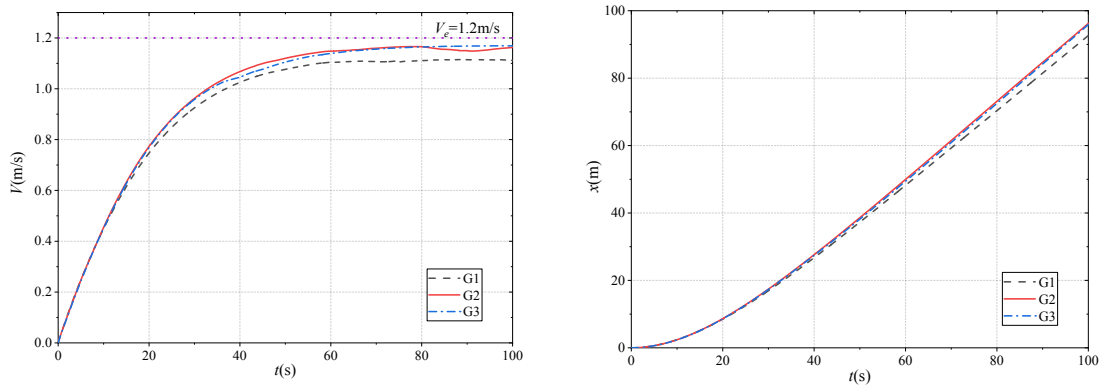


图9 不同网格方案下潜艇轴向速度/位移时历对比

Fig.9 Comparison of submarine axial velocity and displacement time histories under different grid schemes

3 数值计算结果

3.1 水下直航

BB2 潜艇模型稳定直航后,艇体维持一个 0.7° 附近的纵倾角,艏操纵面 4 个舵及围壳舵舵角均维持在 $\pm 1^\circ$ 附近,同时由于螺旋桨旋转过程中的扭矩作用,艇体在加速直航过程中始终维持一个 0.5° 附近的横滚角,最终导致 BB2 潜艇模型稳定直航后的航速 $V=1.166\text{ m/s}$,即额定航速的 97.2%。图 10 为 BB2 潜艇拘束模和自航模螺旋桨推力系数时历变化计算对比结果,可以看出,BB2 潜艇自航模稳定直航后螺旋桨推进系数略低于拘束模螺旋桨推进系数,稳定直航航速并未达到额定航速。

拘束模和自航模水下直航工况下艇体艏段

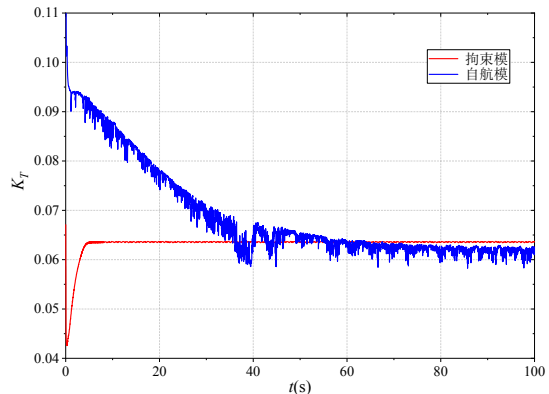


图 10 BB2 潜艇拘束模和自航模螺旋桨推力系数时历对比

Fig.10 Comparison of time histories of the propeller thrust coefficient of BB2 in restraint and free running condition

表面及周围中纵剖面压力系数云图对比结果如图 11 所示。图 12 和图 13 分别表示轴向位置 $x/L=0.980$ (桨盘面前)和 $x/L=0.995$ (桨盘面后)处拘束模和自航模水下直航艇体周围无因次轴向速度云图对比结果,其中自航模速度场采用艇体坐标系。拘束模和自航模水下直航工况下艇体艏段表面及周围中纵剖面压力分布几乎一致,仅在螺旋桨附近存在略微差异;同时桨盘面前后无因次轴向速度分布大致相同,但自航模低速区更向艇体表面收缩,且高速区无因次速度值略大于拘束模,这可能是由于艇体姿态变化及操纵面偏转的影响。

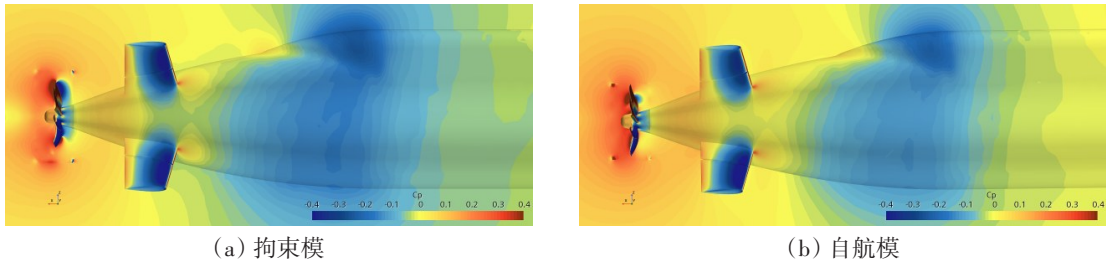


图 11 拘束模和自航模艇体中纵剖面压力系数云图对比
 Fig.11 Comparison of center plane slice colored with pressure coefficient on the hull in restraint and free running maneuvering condition

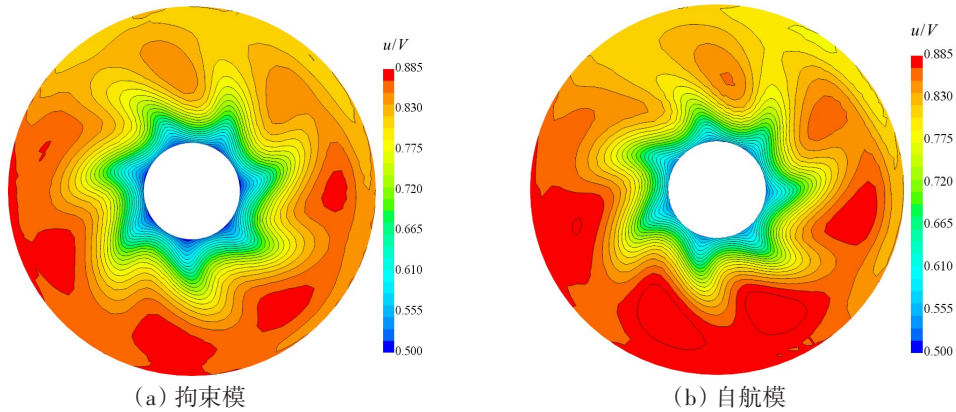


图 12 拘束模和自航模无因次轴向速度对比($x/L=0.980$)
 Fig.12 Comparison of dimensionless axial velocities in restraint and free running maneuvering condition ($x/L=0.980$)

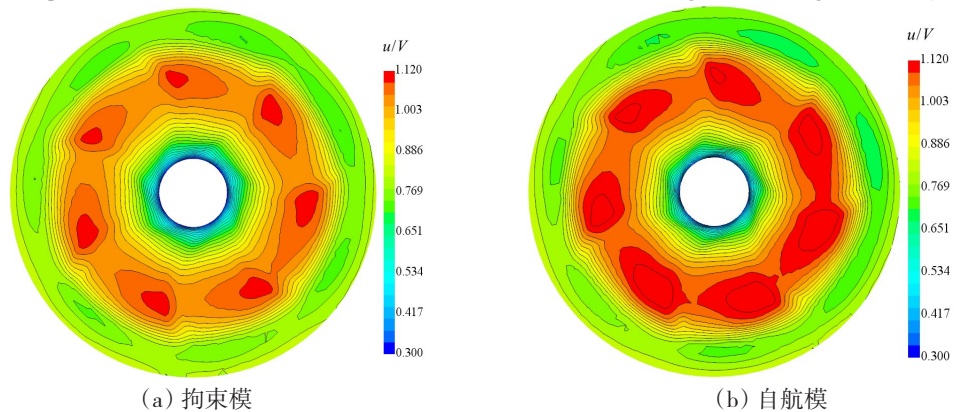
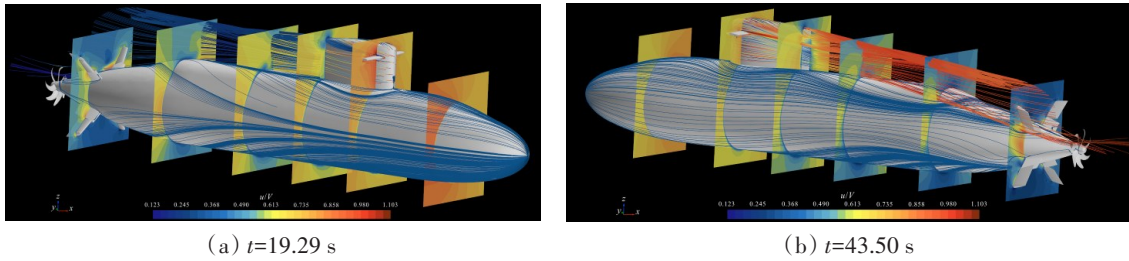


图 13 拘束模和自航模无因次轴向速度对比($x/L=0.995$)
 Fig.13 Comparison of dimensionless axial velocities in restraint and free running maneuvering condition ($x/L=0.995$)

3.2 水下回转

在上节研究的基础上,本节对BB2潜艇模型水下回转运动进行数值模拟,初始定桨转速直航,到达稳定直航状态后($t=0$ s时刻)以最大打舵速率左操舵 20° ,即给操纵面施加 20° 水平控制($\delta_H = 20^\circ$),使艇体向左舷方向做回转运动。在潜艇模型运动过程中,保持与MARIN水池模型试验一致,垂向控

制仅利用舵操纵面来执行,围壳舵舵角始终为0°。图14为BB2潜艇模型回转运动过程中, $t=19.29\text{ s}$ 和 $t=43.50\text{ s}$ 时刻艇体周围瞬态流场分布及艇体表面流线发展云图。

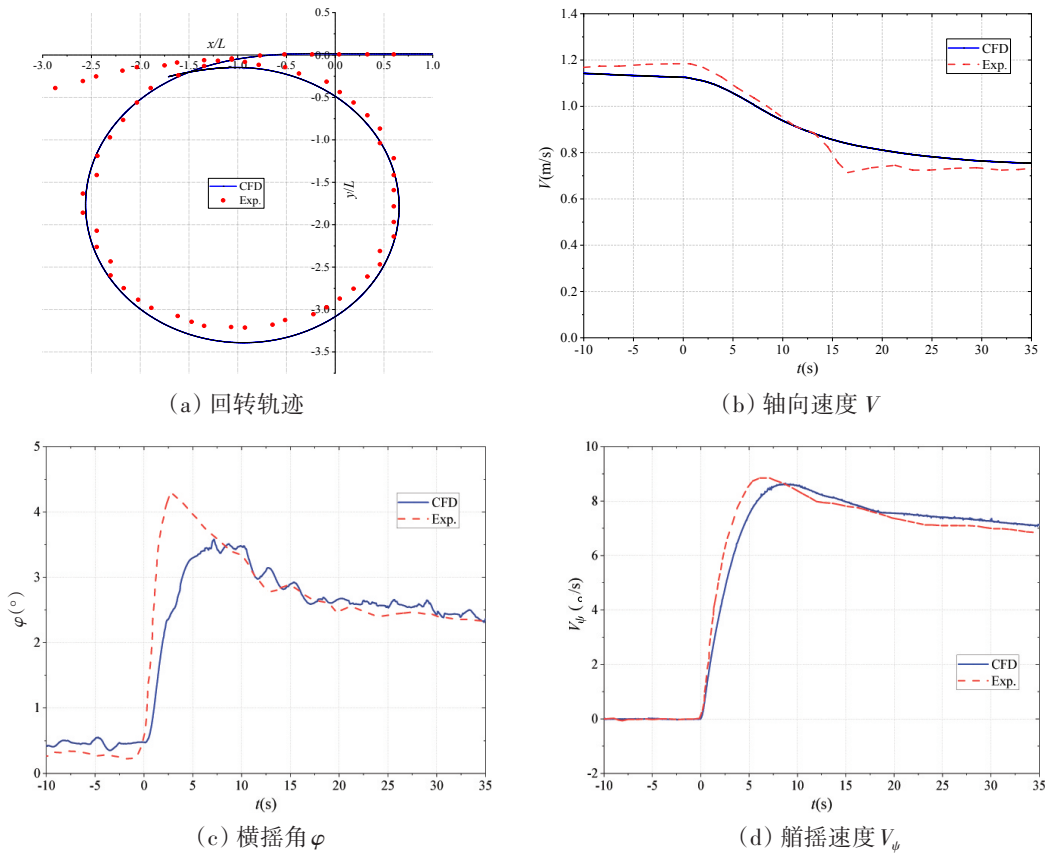


(a) $t=19.29\text{ s}$ (b) $t=43.50\text{ s}$

图14 回转运动艇体周围瞬态流场分布及艇体表面流线发展云图

Fig.14 Distribution of transient flow field around the hull and development of streamline on the hull at turning maneuver

图15为BB2潜艇模型回转运动轨迹以及回转过程中的轴向速度 V 、横摇角 φ 、艏摇速度 V_ψ 数值计算结果与水池试验结果对比情况。数值计算和水池模型试验测试得到的回转直径 D_s 分别为 $3.22L$ 和 $3.12L$,前者比后者大3.2%,在操纵性领域,回转直径计算误差在5%之内一般可满足初始设计要求,应该说本文回转直径的计算精度是令人满意的;轴向速度 V 数值计算时历变化趋势与试验一致,执行回转操舵回转命令后艇体处于偏航状态,轴向速度逐渐减小,且在回转运动过程中逐渐趋于稳定;执行回转操舵回转命令后艇体横摇角 φ 和艏摇速度 V_ψ 迅速增大,在回转过程中又逐渐减小并趋于稳定;由于本文选用的INSEAN E1619螺旋桨与水池试验的MARIN 7371螺旋桨在相同进速系数下产生的扭矩略有差异,数值计算得到的最大横摇角要比试验测试值小16.5%,且与试验相比存在滞后现象;数值计算得到的最大艏摇速度比试验测试值小2.2%,吻合较好。

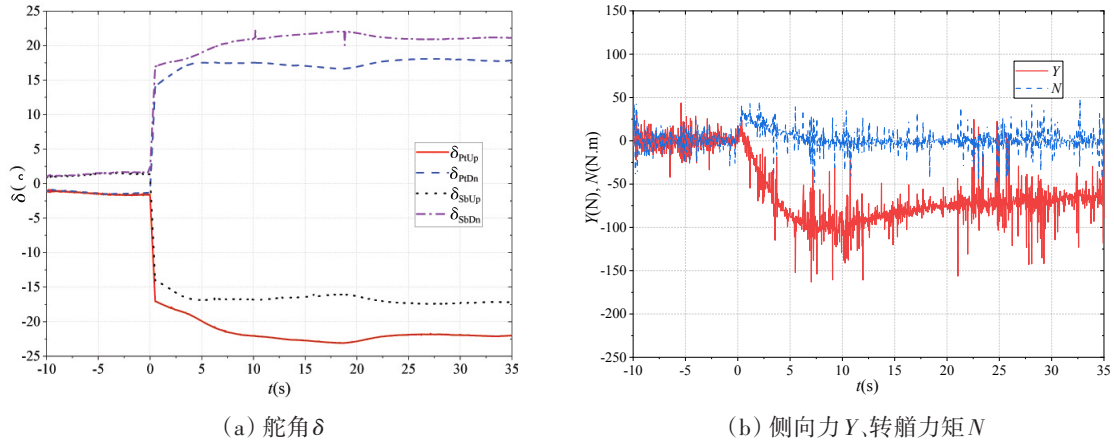


(a) 回转轨迹 (b) 轴向速度 V (c) 横摇角 φ (d) 艏摇速度 V_ψ

图15 回转运动数值计算结果与试验测试结果对比

Fig.15 Comparison of results between numerical calculation and experimental test in turning maneuver

图 16 为 BB2 潜艇模型回转运动中舵操纵面舵角 δ 、侧向力 Y 和转艏力矩 N 的数值计算结果。从图中可以看出,执行回转操舵命令后,舵操纵面迅速偏转至 20° 附近,由于需抑制艇体回转过程中的深沉和纵倾,舵角呈动态变化形式以抵消垂向力和纵倾力矩;执行回转操舵命令后艇体侧向力和转艏力矩幅值迅速增大,使艇体加速回转,且在回转过程中逐渐趋于平稳,转艏速度也逐渐趋于稳定。

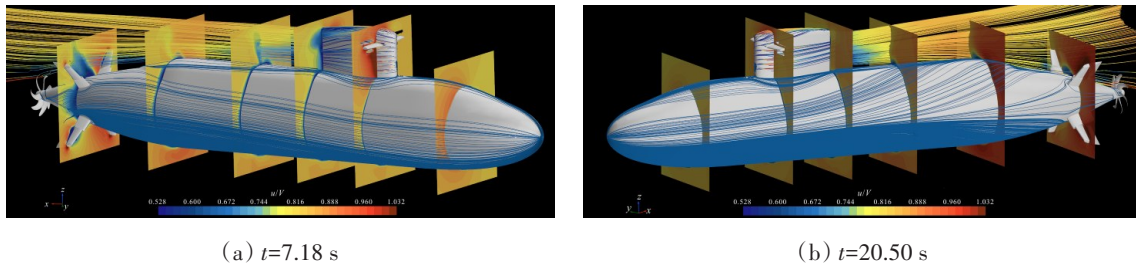


(a) 舵角 δ (b) 侧向力 Y 、转艏力矩 N
图 16 回转运动舵操纵面舵角、侧向力和转艏力矩数值计算结果

Fig.16 Computed results of stern angle, lateral force and yaw moment in turning maneuver

3.3 Z形操舵

本节对 BB2 潜艇模型水平面 $\pm 20^\circ$ Z 形操舵运动进行数值模拟,初始定桨转速直航,到达稳定直航状态后 ($t=0$ s 时刻) 以最大打舵速率左操舵 20° ,即给操纵面施加 20° 水平控制 ($\delta_H = 20^\circ$),使艇体往左舷转向,待左舷转艏至 20° 时立即以最大打舵速率右操舵 20° ,即给操纵面施加 -20° 水平控制 ($\delta_H = -20^\circ$),待右舷转艏至 20° 时立即以最大打舵速率左操舵 20° ,并重复上述过程。在潜艇模型运动过程中,保持与 MARIN 水池模型试验一致,垂向控制利用舵操纵面和围壳舵同时来执行。图 17 为 BB2 潜艇模型 Z 形操舵运动过程中, $t=7.18$ s 和 $t=20.50$ s 时刻艇体周围流场分布及艇体表面流线发展瞬态云图。



(a) $t=7.18$ s (b) $t=20.50$ s
图 17 Z形操舵艇体周围瞬态流场分布及艇体表面流线发展云图

Fig.17 Distribution of transient flow field around the hull and development of streamline on the hull in zigzag maneuver

图 18 为 BB2 潜艇模型 Z 形操舵运动轨迹以及 Z 形操舵过程中的横摇角 φ 、艏摇角 ψ 、艏摇速度 V_ψ 数值计算结果与水池试验结果对比情况。数值计算得到的 Z 形操舵运动轨迹、横摇角 φ 、艏摇角 ψ 、艏摇速度 V_ψ 幅值大小均与水池物理模型试验结果相接近,仅在时间尺度上略微存在相位滞后;同回转运动一样,由于本文选用的 INSEAN E1619 螺旋桨与水池试验的 MARIN 7371 螺旋桨在相同进速系数下产生的扭矩略有差异,数值计算得到的横摇幅值要比试验测试值小 3.2%~18.4%;就艏摇角 ψ 时历曲线而言,数值计算得到的第一超越角比试验测试结果小 8.8%,第二超越角比试验测试结果大 8.6%,均吻合较好;数值计算得到的艏摇速度幅值和试验测试结果相比,误差也在 10% 以内。

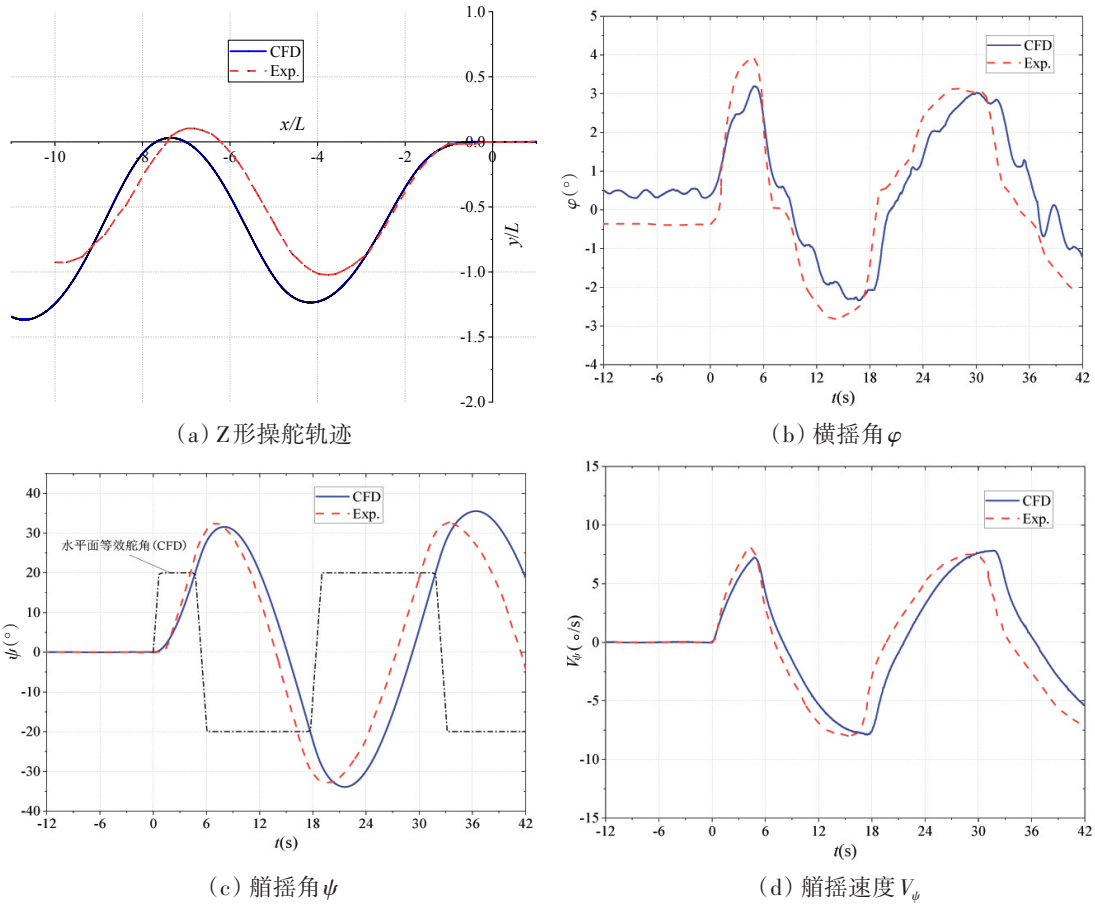


图 18 Z形操舵运动数值计算结果与试验测试结果对比

Fig.18 Comparison of results between numerical calculation and experimental test in zigzag maneuver

图 19 为 BB2 潜艇模型 Z 形操舵运动中舵操纵面舵角 δ 、侧向力 Y 和转舵力矩 N 的数值计算结果。从图中可以看出,随着 Z 形操舵命令的执行,舵操纵面舵角以最大转舵速率迅速偏转至 $\pm 20^\circ$ 附近,且呈动态变化形式以抵消垂向力和纵倾力矩;艇体侧向力和转舵力矩随着舵操纵面的偏移,分别在 $\pm 100\text{ N}$ 和 $\pm 50\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间来回变化,使潜艇模型呈水平面 Z 形轨迹运动。

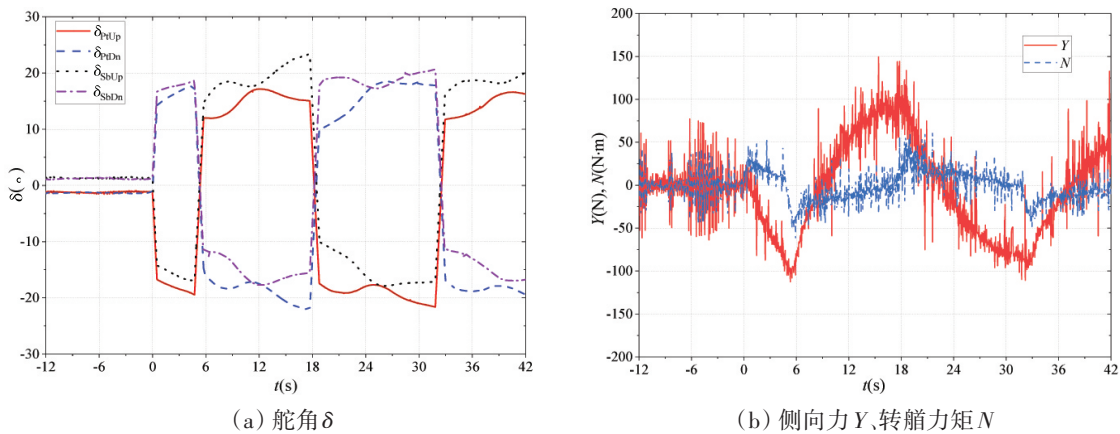


图 19 回转运动舵操纵面舵角、侧向力和转舵力矩数值计算结果

Fig.19 Computed results of stern angle, lateral force and yaw moment in zigzag maneuver

3.4 紧急倒车

本节对 BB2 潜艇模型水下紧急倒车运动进行数值模拟,初始定桨速直航($n=4.6\text{ r/s}$),到达稳定直

航状态后,立即反转螺旋桨,使其转速在5 s之内迅速降至为 $n=-5.0$ r/s,直至潜艇航速降为0。由于该工况没有相对应的试验数据,本文仅对BB2潜艇模型紧急倒车过程中的动力学和运动学现象进行初步探索。螺旋桨转速 n 和推力 T 变化时历曲线如图20所示。

图21和图22分别为BB2潜艇模型紧急倒车运动过程中, $t=4.97$ s(减桨转速倒车状态)和 $t=17.08$ s(恒桨转速倒车状态)时刻轴向位置 $x/L=0.980$ (桨盘面前)、 $x/L=0.990$ (桨盘面)、 0.995 (桨盘面后)处艇体周围无因次轴向速度云图结果。从图中可以看出,在螺旋桨减转速倒车过程中,桨附近流场十分紊乱,水流汇入桨盘面的方向发生改变,叶片所在区域前后流场对应的正高速区转为负高速区,螺旋桨负推力值随着桨反转速度的增大而增大;待螺旋桨转至稳定反转转速后,螺旋桨附近轴向速度分布依旧十分紊乱,并没有恢复至正车前进中的周向对称分布状态,且由于航速的减小和艇体姿态角的变化(见图23),螺旋桨负推力值处于动态变化过程中。

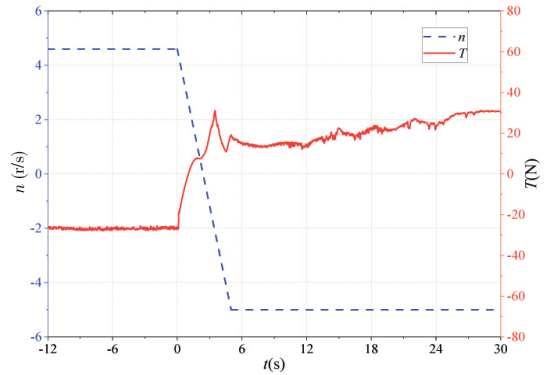


图20 紧急倒车螺旋桨转速/推力时历曲线
Fig.20 Time histories of rotation speed and thrust of the propeller in crashback

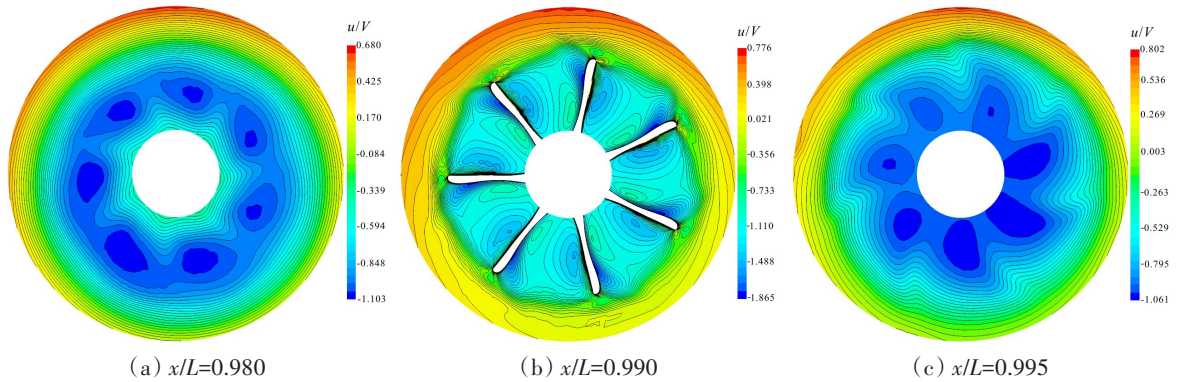


图21 螺旋桨附近无因次轴向速度($t=4.97$ s)
Fig.21 Axial velocity near the propeller in crashback ($t=4.97$ s)

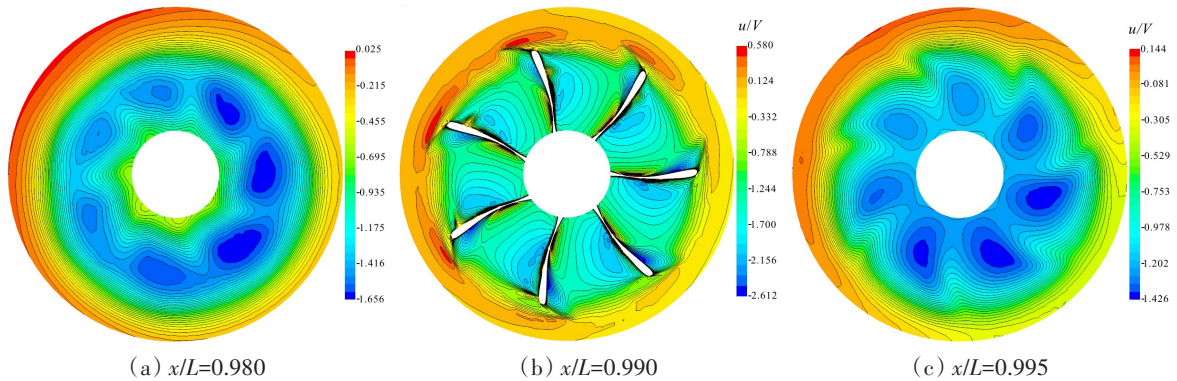


图22 螺旋桨附近无因次轴向速度($t=17.08$ s)
Fig.22 Axial velocity near the propeller in crashback ($t=17.08$ s)

图23为BB2潜艇模型紧急倒车过程中的轴向速度 V 、姿态角(横摇角 φ 、纵摇角 θ 、艏摇角 ψ)、舵操纵面和围壳舵舵角 δ 、流体动力矩(横倾力矩 K 、纵倾力矩 M 、转舵力矩 N)的数值计算结果。螺旋桨执行紧急倒车命令后,推力减小导致潜艇轴向速度逐渐变小,同时螺旋桨反转后的负扭矩导致艇体横摇角转为负值。在紧急倒车螺旋桨附近流场结构的剧烈变化而产生的非定常侧向力和垂向力作用下,潜艇的纵摇角和艏摇角发生周期性振荡变化,为维持艇体运动姿态平衡,舵操纵面和围壳舵舵角亦随

之周期性振荡变化,舵操纵面最大舵角接近 10° 。

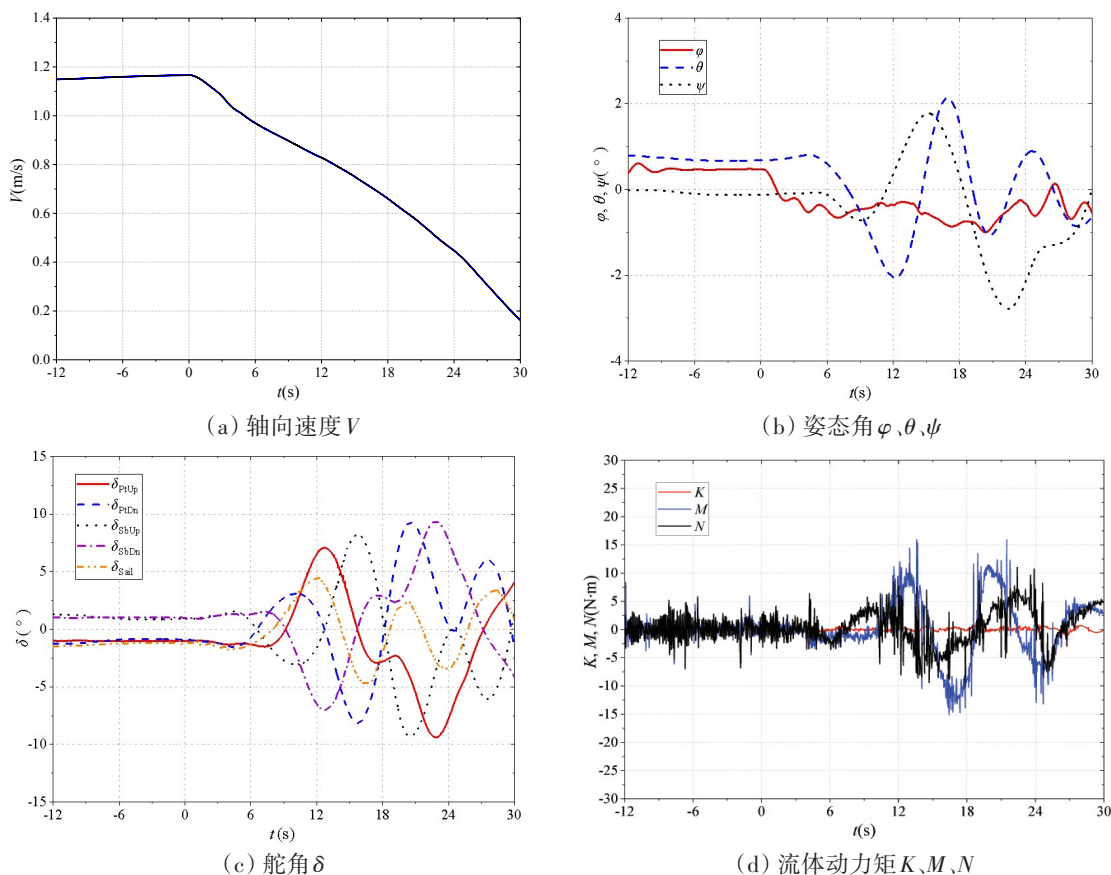


图23 紧急倒车数值计算结果

Fig.23 Numerical calculation results in crashback

4 结 论

本文基于Joubert BB2潜艇匹配INSEAN E1619螺旋桨模型,开展了潜艇自航模水下直航、水下回转、水平面Z形操舵、紧急倒车等典型工况的数值模拟研究。主要结论如下:

(1) 本文采用基于重叠网格的方法对潜艇六自由度耦合运动及各操纵面的独立运动直接数值建模,并利用滑移网格技术直接模拟艇后螺旋桨的转动,采用自动舵PD控制器实现艇体水平和垂向姿态闭环控制,从时间步长和网格划分方案选取等基础技术细节出发,建立了潜艇水下自航模的数值模拟方法;

(2) 本文开展了潜艇自航模水下直航、水下回转、水平面Z形操舵、紧急倒车等典型工况的数值模拟,并将典型运动参数数值模拟结果与水池物理模型试验结果进行了对比分析,其中水下回转运动数值计算得到的回转直径比水池模型试验测试得到的结果大3.2%,Z形操舵运动数值计算得到的第一超越角和第二超越角与水池模型试验测试结果相比不超过8.8%,验证了本文建立的潜艇自航模数值模拟方法的工程预报实用性;

(3) 本文对潜艇自航模紧急倒车运动进行了初步的数值模拟分析,潜艇紧急倒车时螺旋桨附近流场结构变化十分剧烈,在其产生的非定常侧向力和垂向力作用下,潜艇的纵摇角和艏摇角发生周期性振荡变化,为维持艇体运动姿态平衡,舵操纵面和围壳舵舵角亦随之周期性振荡变化。

本文建立的潜艇自航模数值模拟方法适用于任意的潜艇自航模模型,可为潜艇操纵性和适航性预报与评估以及潜艇自航模模型试验技术完善提供技术支撑。

参 考 文 献:

- [1] ITTC-Recommended procedures guidelines. Free running model tests[R]. ITTC, 2021.
- [2] 冯学知, 缪泉明, 蒋强强, 蔡大明. 潜艇近水面波浪力试验研究[J]. 船舶力学, 1997, 1(2): 24-28.
Feng X Z, Miao Q M, Jiang Q Q, Cai D M. The experiment analysis for waves forces of a slender body running near the free-surface in regular waves[J]. Journal of Ship Mechanics, 1997, 1(2): 24-28. (in Chinese)
- [3] 冯学知, 蒋强强, 缪泉明, 匡晓峰. 潜艇波浪中近水面不同潜深和航向时运动和波浪力计算[J]. 船舶力学, 2002, 6(2): 1-14.
Feng X Z, Jiang Q Q, Miao Q M, Kuang X F. Computation of motion and waves forces for a submarine running near free surface in different depth of immersion and direction[J]. Journal of Ship Mechanics, 2002, 6(2): 1-14. (in Chinese)
- [4] 徐 铿, 甘品章. 水下自航模型操纵性试验[J]. 舰船性能研究, 1976, 1: 239-249.
Xu K, Gan P Z. Submerged free running submarine model tests[J]. Ship Performance Research, 1976, 1: 239-249. (in Chinese)
- [5] 甘品章, 华伟, 章鸿度, 等. 潜艇自航模操纵性试验技术[J]. 舰船性能研究, 1983, 1: 73-83.
Gan P Z, Hua W, Zhang H D, et al. Maneuverability test technology for free running submarine model[J]. Ship Performance Research, 1983, 1: 73-83. (in Chinese)
- [6] 周广礼, 欧勇鹏, 等. 潜艇操纵性预报研究现状与前景展望[J]. 中国造船, 2018, 59(3): 203-214.
Zhou G L, Ou Y P, et al. Progress and prospect of maneuverability prediction for submarine[J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(3): 203-214. (in Chinese)
- [7] Bettle M, Gerbera A, Watt G. Unsteady analysis of the six DOF motion of a buoyantly rising submarine[J]. Comput. Fluids, 2009, 38: 1833-1849.
- [8] Dreyer J J, Boger D A. Validation of a free-swimming, guided multibody URANS simulation tools[C]//28rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Pasadena, CA, 2010.
- [9] Chase N, Michael T, Carrica P M. Overset simulations of a submarine in towed, self-propelled and maneuvering conditions [J]. Int. Shipbuilding Progr., 2013, 60: 171-205.
- [10] Chase N, Carrica P M. CFD simulations of a submarine propeller and application to self-propulsion of a submarine[J]. Ocean Eng., 2013, 60: 68-80.
- [11] Sun-Eun K, Bong R, Hua S. URANS simulation of propeller-hull interactions on an underwater body in maneuver[C]//30th Symposium on Naval Hydrodynamics, Hobart, Tasmania, Australia, 2014.
- [12] Martin J E, Michael T J, Carrica P M. Submarine maneuvers using direct overset simulation of appendages and propeller and coupled CFD/potential flow propeller solver[J]. Journal of Ship Research, 2015, 59(1): 31-48.
- [13] Overpelt B, Nienhuis B, Anderson B. Free running maneuvering model tests on a modern generic SSK Class submarine (BB2) [C]//Pacific 2015, Sidney, Australia, 2015.
- [14] Carrica P M, Kerkvliet M, Quadvlieg F, et al. CFD simulations and experiments of a maneuvering generic submarine and prognosis for simulation of near surface operation[C]//31st Symposium on Naval Hydrodynamics, Monterey, CA, 2016.
- [15] Carrica P M, Kim Y, Martin E. Near surface operation of a generic submarine in calm water and waves[C]//32nd Symposium on Naval Hydrodynamics, Hamburg, Germany, 2018.
- [16] Carrica P M, Kim Y, Martin E. Near-surface self propulsion of a generic submarine in calm water[J]. Ocean Eng., 2019, 183: 87-105.
- [17] Kim Y, Martin E, Carrica P M. Vertical zigzag and controlled turn maneuvers of a generic submarine in deep water and near the surface in irregular waves[C]//33rd Symposium on Naval Hydrodynamics, Osaka, Japan, 2020.
- [18] 廖欢欢, 庞永杰, 等. 基于重叠网格技术的潜艇应急上浮空间运动的数值模拟[C]//第二十七届全国水动力学研讨会文集, 2015.
Liao H H, Pang Y J, et al. Numerical simulation based on the overset grid technique about submarine emergency ascent space movement[C]//Proceedings of the 27th National Hydrodynamics Symposium, 2015. (in Chinese)
- [19] 周广礼, 董文才, 欧勇鹏. 潜艇应急上浮六自由度运动及黏性流场数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(2): 1-6.

- Zhou G L, Dong W C, Ou Y P. Numerical simulation of six degree of freedom motion and viscous flow for submarine's emergency ascent[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(2): 1-6. (in Chinese)
- [20] 张楠, 李亚, 黄苗苗, 陈默. 艇桨耦合状态螺旋桨水动力与噪声数值预报方法研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(11): 1439-1451.
- Zhang N, Li Y, Huang M M, Chen M. Numerical prediction approach for hydrodynamic force and noise of propeller in submarine propeller interaction condition[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(11): 1439-1451. (in Chinese)
- [21] 汪训铭, 张楠. 潜艇紧急倒车工况流场与水动力的大涡模拟研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(11): 1595-1610.
- Wang X M, Zhang N. Large eddy simulation of the flow field and hydrodynamic force of submarine in crashback[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(11): 1595-1610. (in Chinese)
- [22] Joubert P N. Some aspects of submarine design Part 1[R]. Australia Defence Science and Technology, Organisation Report DSTO-TR-1622, 2004.
- [23] Joubert P N. Some aspects of submarine design Part 2[R]. Australia Defence Science and Technology, Organisation Report DSTO-TR-1920, 2006.
- [24] Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London:Academic Press, 1972.