

引用格式: 陈纪军, 潘子英, 彭超, 等. 十字形和X形艉舵航行体的水动力特性对比[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2): 8–16.
CHEN J J, PAN Z Y, PENG C, et al. Comparison of hydrodynamic characteristics of SUBOFF with cruciform and X-form rudder arrangement[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(2): 8–16.

十字形和X形艉舵航行体的水动力特性对比



扫码阅读全文

陈纪军*, 潘子英, 彭超, 夏贤, 邱耿耀, 李永成

中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082

摘要: [目的] 对于水下航行体的艉布局而言, 相较十字形艉布局, X形艉布局具有不超宽、降低舵卡严重后果等优点。由于X形艉布局及其操纵较为特殊, 其水动力特性与十字形不同。以SUBOFF为原型, 通过数值计算对比十字形和X形艉布局航行体的操纵性水动力特性。[方法] 首先, 对比十字形艉布局线性水动力的数值计算与模型试验数据, 确定数值计算的网格参数; 其次, 对全动舵面积相同的X形艉布局航行体线性水动力进行预报, 并与十字形艉布局进行对比; 最后, 采用体积力模拟螺旋桨抽吸, 对比研究两方案操纵性水动力特性的差异。[结果] 结果表明: 在相同全动舵面积下, 相较十字形艉, X形艉布局航行体水平面静不稳定系数略小, 垂直面静不稳定系数略大; 受相邻两舵干扰影响, X形航行体垂直面、水平面舵力特性具有较为明显的不对称性, 舵导数减小约27%; 抽吸显著改变了十字形和X形艉布局航行体的水动力, 舵导数增大约15%~18%。[结论] 研究成果可为水下航行体操纵性设计提供一定的借鉴。

关键词: SUBOFF; 操纵面; 水动力特性; 静不稳定系数; 数值模拟

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01799

Comparison of hydrodynamic characteristics of SUBOFF with cruciform and X-form rudder arrangement

CHEN Jijun*, PAN Ziyang, PENG Chao, XIA Xian, QIU Gengyao, LI Yongcheng

China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China

Abstract: [Objectives] Underwater vehicles with an X-plane arrangement can be designed to handle plane control jams, and are characterized by their safety over vehicles with a cruciform arrangement. Because of the different arrangement and control mode of the X-plane arrangement, its hydrodynamic characteristics are different from those of a cruciform arrangement. [Methods] Numerical simulations of the cruciform arrangement are carried out on SUBOFF and validated first with the model test results and then in combination with the determined meshing method. The hydrodynamic characteristics of the X-plane arrangement are then studied and compared with those of a cruciform arrangement with the same rudder area. Finally, simulations of both the cruciform and X-plane arrangements with propellers modelled by body force are carried out. [Results] The results show that the horizontal and vertical stability coefficient of the X-plane arrangement is almost the same and declines compared with those of the cruciform arrangement respectively. The force characteristics of the X-plane arrangement are nonlinear with its angle, and the derivatives of the rudder decline by about 27%. The pump effect improves the stability coefficients and enhances the derivatives of the control surface by about 15%–18%. [Conclusions] The results of this study can provide guiding references for the design of underwater vehicles.

Key words: SUBOFF; control surface; hydrodynamic characteristics; statical instability coefficient; numerical simulation

收稿日期: 2019-10-17

修回日期: 2019-12-04

网络首发时间: 2020-04-28 15:08

作者简介: 陈纪军, 男, 1984年生, 硕士, 高级工程师。

潘子英, 男, 1979年生, 硕士, 研究员。

彭超, 男, 1988年生, 硕士, 高级工程师。

夏贤, 男, 1967年生, 高级工程师。

*通信作者: 陈纪军

0 引言

操纵性是水下航行体综合航行性能的重要方面,而舵操纵面的布局选型与设计直接决定了操纵性的优劣。相较十字形舵布局,X形舵布局有一定的优势。由于X形舵布局及其操纵的特殊性,其水动力特性与十字形相比有所不同。因此,对比研究2个不同舵布局的操纵性及水动力特性对于水下航行体操纵性设计及其操纵性能评估具有重要意义。

加拿大DRDC的Mackay^[1]整理了1987~1988年间完成的十字形和X形舵布局潜艇缩比尾段水平面风洞模型试验结果,包括对尾段位置力和单独舵操纵面的压力测量,风洞模型试验表明:水平面内X形舵布局设计方案失速角增大,四舵同操的舵力提高。意大利CNR的Broglia等^[2]针对十字形和X形舵布局潜艇深水及近水面时水平面内非定常PMM运动的水动力进行了数值模拟,并对这2个方案的稳定性进行了对比评估,研究表明,由于X形舵布局设计方案横向投影面积大于十字形舵布局,故X形舵布局方案更稳定。Zaghi等^[3]采用数值模拟对上述2种布局方案在水平面内的定深回转机动进行了研究,结果表明,由于X形舵布局采用四舵同时操纵策略,其回转能力显著优于十字形舵布局方案。

针对X形舵操纵不直观的特点,张涛和林俊兴^[4]通过理论分析,分别给出了X形舵相同舵面积、不同舵面积时与十字形舵的等效关系;胡坤等^[5-6]在世界各国X形舵潜艇发展概况的基础上,分析了X形舵潜艇操纵性水动力(矩)和控制方法,提出了X形舵与十字形舵等效舵角转换装置设计思想,并采用数值仿真,比较了X形舵和十字形舵的操纵特性,提出了今后工作中待解决的4个问题,其中有3个是关于X形舵布局潜艇水动力特性的研究。吴军^[7]基于理论计算,比较了

十字形及X形舵布局的操纵特性,但这2套研究方案的舵操纵面面积不同。张露等^[8]采用数值计算方法,比较了面积相等的十字形与X形舵布局水下航行体的水动力特性,包括直航阻力与不同攻角状态的升力,但未就漂角,尤其是舵角(方向舵、升降舵)相关的水动力特性对比展开进一步的研究。

综上,国内外学者已针对十字形及X形舵布局的航行体水动力特性开展了对比研究,表明了X形舵布局方案具有优良的操纵性。但是,现有研究中十字形及X形舵布局方案的设计面积往往是不同的,在研究内容上也仅局限于水平面或垂直面单一平面,且X形舵布局方案的操控均是以四舵同操模式给出。

鉴于此,以SUBOFF为原型,针对全动舵面积相同的十字形及X形舵布局,对比分析2种方案操纵性水动力特性的差异,包括攻角、漂角及舵角(升降舵、方向舵)相关的水动力特性。

1 研究对象

本文仿真计算的对象有2个:SUBOFF原型(十字形舵布局)及SUBOFF改型(X形舵布局),如图1所示。其中,SUBOFF原型由主体、围壳、舵操纵面(4个全动舵,十字形)及呈X布置的支柱支撑的导管构成,主要参数如表1所示^[9];SUBOFF改型由原型方案舵操纵面(4个全动舵)顺时针旋转45°得到。

2 计算方法验证

2.1 计算工况

文献[9]详尽给出了SUBOFF原型水平面变漂角、垂直面变攻角等相关的线性水动力(矩)导数获取方法及量值,是历来世界各国学者数值计算方法验证的重要参考。类似地,这些导数将用

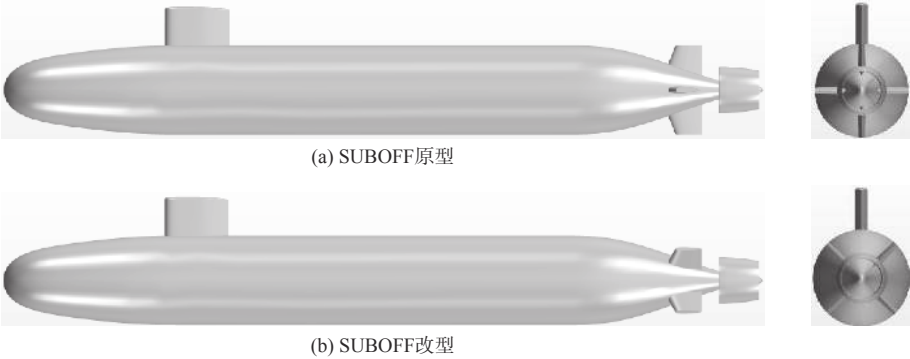


图 1 研究对象

Fig. 1 Research objects

表 1 SUBOFF 原型主要参数

Table 1 Main parameters of SUBOFF prototype

参数	量值
垂线间长 L_{pp}/m	4.261
坐标原点距船纵向距离 x/m	2.013
坐标原点距基线垂线距离 z/m	0.254
舵轴距舵尾缘纵向距离 x_R/m	0.137
舵面积 S/m^2	0.025

于本文基于 STAR-CCM+建立的操纵性水动力数值计算方法的校核。该计算软件在预报分析水动力和流场方面显示了其适用性^[10]。

本文数值计算方法验证的工况及其对应的导数如表 2 所示。计算方案中的漂角 β 、攻角 α 及侧向力 Y 、垂向力 Z 、纵倾力矩 M 、偏航力矩 N 按

表 2 计算工况

Table 2 Computational cases

计算工况	参量变化范围	拟合导数
变漂角	$\beta = \pm 1^\circ, \pm 2^\circ$	Y_v', N_v'
变攻角	$\alpha = \pm 1^\circ, \pm 2^\circ$	Z_w', M_w'

照通用艇体坐标系定义^[9]。

2.2 计算参数及数据表达

参考模型试验雷诺数 ($Re=1.4\times10^7$) 并基于平板假定,初步确定计算模型边界层最大厚度^[11];根据水下航行体操纵性水动力计算经验^[12],取 $y^+=60$, 结合试验雷诺数,确定计算模型近壁面第 1 层网格尺寸。此外,结合操纵性水动力计算需要,针对 SUBOFF 原型的围壳、舵、导管及其支柱等进行了独立设置,如表 3 所示。

表 3 网格生成参数

Table 3 Main parameters of mesh generation

控制类型	参数名称	量 值		
		网格1	网格2	网格3
默认控制	基础尺寸/m	0.4	0.2	0.1
	表面增长率	1.3	1.3	1.3
	棱柱层数	10	10	10
	近壁面厚度/m	0.001	0.001	0.001
	棱柱层总厚度/m	0.063	0.063	0.063
自定义控制（围壳、舵、导管及支柱）	目标表面尺寸/m	0.004	0.008	0.016
	最小表面尺寸/m	0.001	0.002	0.004

模型计算域为长方形,前方和侧面均取 2 倍艇长,后方取 3 倍艇长(图 2)。边界条件定义如下:

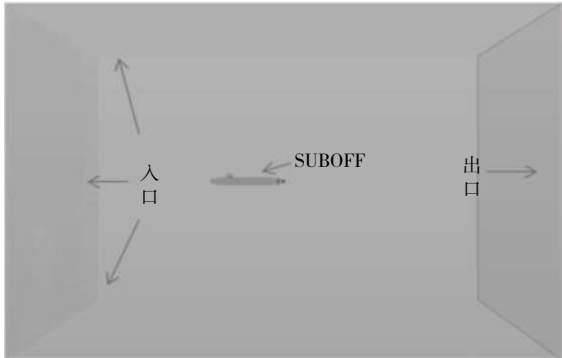


图 2 计算域
Fig. 2 Computational domain

- 1) 入口——模型前方和侧面,定义为速度入口,根据模型试验雷诺数及数值计算软件中默认的动力粘度,设定入口合速度为 2.93 m/s,湍流强度取 2%,湍流粘度比取 2;
- 2) 出口——模型后方,定义为压力出口,湍

- 流强度及粘度比与入口定义相同;
- 3) 物面——定义为静止无滑移。

整个计算域采用棱柱六面体网格划分。通过调整基础尺寸进行网格收敛性研究,形成了 3 套计算网格,如图 3 所示,网格数分别约 40 万、145 万

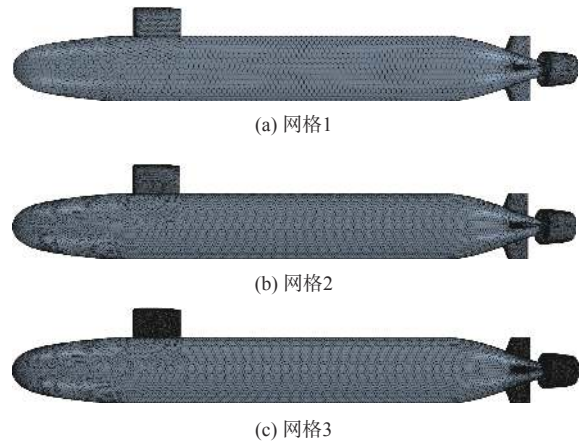


图 3 网格划分
Fig. 3 Mesh division of SUBOFF

和 453 万。图 3 给出了 3 套不同网格中 SUBOFF 原型表面的网格划分。

控制方程包括时均的连续方程及 N-S 方程, 并采用湍流模型 RNG $k-\varepsilon$ 封闭。

针对 SUBOFF 原型, 对采用数值计算方法得到的操纵性水动力进行无因次化:

$$Y' = Y / \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^2, \quad Z' = Z / \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^2,$$
$$M' = M / \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^3, \quad N' = N / \frac{1}{2} \rho U^2 L_{pp}^3 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体介质密度, 取 997.561 kg/m^3 ; U 为入口合速度。

2.3 计算结果及验证

基于上述 3 套网格, 开展水平面变漂角、垂直面变攻角水动力数值计算。各工况下的数值计算结果对比如图 4 所示, 对其进行拟合得到的水动力导数如表 4 所示。

由表 4 可知, 数值计算获得的漂角、攻角相关的位置力导数除 M_w' 外, 随着网格数的增多, 与模型试验的偏差越来越小, 且网格 2 与网格 3 的

结果基本相当, 也即可以认为此时数值计算结果与网格基本无关。综合考虑计算成本及精度, 本文后续研究均采用网格 2 对应生成的参数进行各工况的数值计算。

3 舵操纵面布局影响

3.1 计算结果

基于前述建立的数值计算方法, 针对 SUBOFF 原型和改型开展了舵布局改变对操纵性水动力特性影响的数值计算研究:

1) 为了比较两舵布局方案的位置力特性, 针对 SUBOFF 改型漂角、攻角相关的操纵性水动力进行了数值计算, 并处理获得了各线性位置力导数。

2) 为了比较两舵布局方案的舵力特性, 针对 SUBOFF 原型和改型舵角相关的操纵性水动力进行了数值计算(方向舵角 δr 、升降舵角 $\delta s = -15^\circ \sim +15^\circ$ 、变化间隔 $\Delta = 5^\circ$), 并处理获得了各个舵导数。为便于客观分析各平面内的舵导数, 参考十

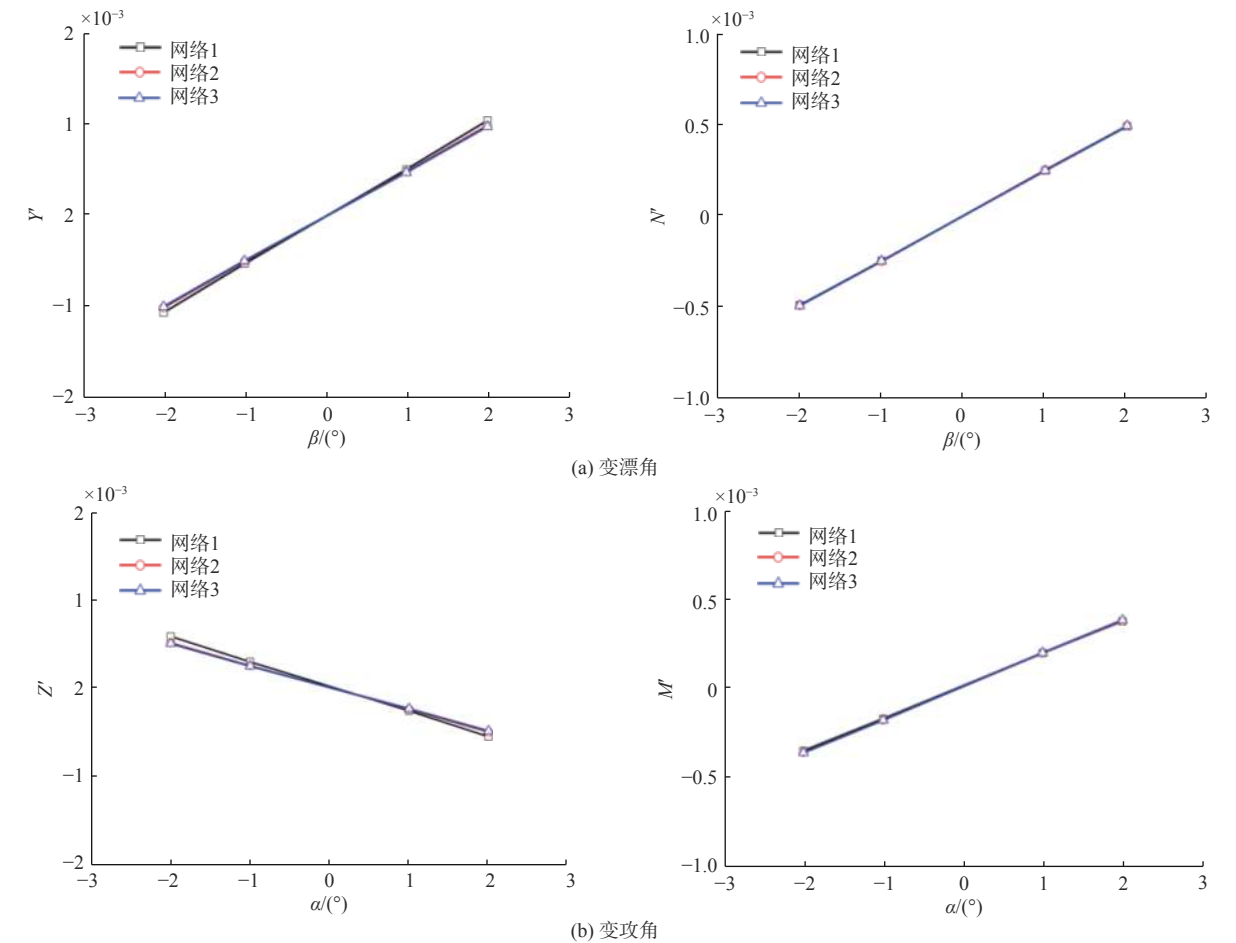


图 4 计算结果

Fig. 4 Computational results

表 4 水动力导数对比

Table 4 Comparison of hydrodynamic derivatives between different meshes

水动力导数	数值计算			模型试验	偏差/% (数值计算/模型试验-1)		
	网格1	网格2	网格3		网格1	网格2	网格3
1 000Y _v '	-30.094	-28.536	-28.215	-27.834	8.1	2.5	1.4
1 000N _v '	-13.992	-14.058	-14.048	-13.648	2.5	3.0	2.9
1 000Z _w '	-16.021	-14.231	-13.934	-13.910	15.2	2.3	0.2
1 000M _w '	10.331	10.513	10.605	10.324	0.1	1.8	2.7

字形艏布局左/右、上/下两舵同步操纵的特点, 改型方案选取右舷两舵和下侧两舵同步操纵, 分别实现十字形艏布局方向舵和升降舵的功能。图 5 所示为改型方案方向舵角和舵升降舵角正、负角度定义: 方向舵以右舷两舵同操产生朝右舷的合力为正, 反之为负; 舵升降舵角以下侧两舵同操产生朝上的合力为正, 反之为负。



图 5 X 舵舵角定义

Fig. 5 Definition of rudder angle and stern plane angle

3) 为了比较两舵布局方案带动力下的操纵性水动力特性, 采用体积力模拟螺旋桨抽吸, 针对 SUBOFF 原型和改型, 对漂角、攻角和舵角相关的操纵性水动力特性进行了数值计算。这里, 螺旋桨水动力特性模型采用软件默认的五叶桨模型^[13], 正式计算前, 根据 SUBOFF 原型直航阻力、螺旋桨推力间的平衡匹配, 确定体积力模型的主要参数, 如表 5 所示。

上述各工况的计算曲线及对应导数处理结果分别如图 6 和表 6 所示。其中, l'_{β} 、 l'_{α} 分别为无因次水平面、垂直面水动力倾覆力臂; $l'_{\delta r}$ 、 $l'_{\delta s}$ 分别为无因次方向舵、舵升降舵舵力臂。

3.2 数据分析

由图 6 及表 6 可知, 在相同全动舵面积下, 不

表 5 螺旋桨体积力模型主要参数设置

Table 5 Main parameters setup for body force model of propeller

参数	数值
内半径/m	0.04
外半径/m	0.10
厚度/m	0.03
转速/(r·min ⁻¹)	1 548

同舵布局方案的位置导数基本相当, 但舵导数相差较大。具体为:

1) 相较原型, 虽然改型方案舵舵在水平面、垂直面的侧投影面积减小了, 但改型方案漂角相关位置导数 Y'_v 略大, N'_v 略小, 水平面静不稳定系数略小; 攻角相关位置导数 Z'_w 略小, M'_w 略大, 垂直面静不稳定系数略大。2 个平面内静不稳定系数差别的原因与舵舵/围壳相互干扰是关联的, 表 7 为 2 个模型主、附体水平面内水动力的贡献对比, 图 7 为漂角为 2° 时 2 个模型围壳的流线对比。由表 7 和图 7 可知: 原型方案中, 上舵处于围壳尾流中, 水动力贡献较小, 约为下舵的 16%; 改型方案中, X 形舵布局使得围壳尾流对上舵的影响较小, 水动力约为下两舵的 23%, 从而使得改型方案上、下四舵的贡献增大, 静不稳定性系数减小。

2) 相较原型, 改型方案的舵导数减小了约 27%, 这与其舵布局是相关的: 因改型方案舵舵呈 X 形布置, 各舵产生的水动力合力在水平面、垂直面分解后约为十字形的 $\sqrt{2}/2$ 倍; 改型方案舵力随正、负舵角的线性度不同, 表 8 所示为各舵正负舵角范围内分别拟合的水动力导数对比。

由表 8 可知, 改型方案正方向舵舵角时的舵导数明显大于负方向舵舵角时的情形, 负升降舵舵角时的舵导数明显大于正升降舵舵角时的情形, 两者的高舵导数均对应于舵舵部彼此分离情形(图 5)。以升降舵为例, 给出了 ±15° 升降舵角时左下舵压力面和吸力面的压力云图对比, 如图 8

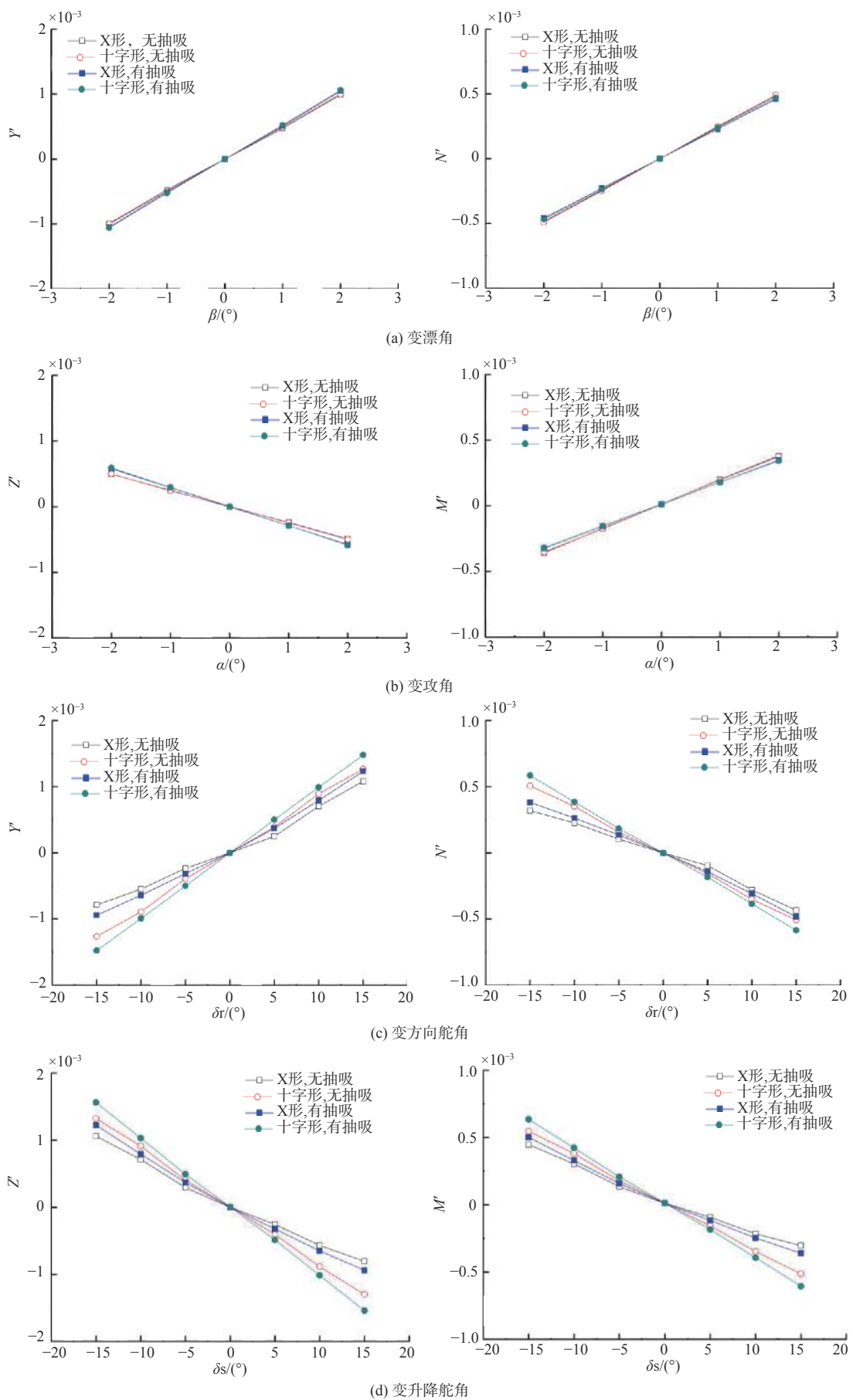


图 6 计算结果对比

Fig. 6 Comparison of computational results between SUBOFF prototype and its modification

表 6 SUBOFF 原型和改型水动力导数对比

Table 6 Comparison of hydrodynamic derivatives between SUBOFF prototype and its modification

序号	水动力系数	无动力			有动力		
		原型	改型	偏差/% (改型/ 原型-1)	原型	改型	偏差/% (改型/ 原型-1)
1	$1\,000Y_v'$	-28.536	-28.730	0.7	-30.155	-30.573	1.4
2	$1\,000N_v'$	-14.058	-14.034	-0.2	-13.394	-13.261	-1.0
	l_β'	0.493	0.488	—	0.446	0.434	—
3	$1\,000Z_w'$	-14.231	-14.199	-0.2	-16.779	-16.556	-1.3
4	$1\,000M_w'$	10.513	10.611	0.9	9.525	9.609	0.9
	l_α'	0.739	0.749	—	0.568	0.580	—
5	$1\,000Y_{\delta_r}'$	4.885	3.517	-28.0	5.665	4.127	-27.1
6	$1\,000N_{\delta_r}'$	-1.945	-1.420	-27.0	-2.261	-1.641	-27.4
	l_{δ_r}'	-0.398	-0.404	—	-0.399	-0.398	—
7	$1\,000Z_{\delta_s}'$	-4.972	-3.566	-28.3	-5.889	-4.123	-30.0
8	$1\,000M_{\delta_s}'$	-1.956	-1.441	-26.3	-2.353	-1.643	-30.2
	l_{δ_s}'	-0.393	-0.404	—	0.400	0.398	—

表 7 主、附体水平面水动力贡献对比

Table 7 Comparison of horizontal hydrodynamic derivatives between different parts

水动力导数	原 型			改 型				
	主体等	上舵	下舵	主体等	右上舵	左下舵	右下舵	左上舵
$1\,000Y_v'$	-26.490	-0.281	-1.765	-26.412	-0.219	-0.939	-0.939	-0.219
$1\,000N_v'$	-14.981	0.180	0.743	-15.035	0.093	0.408	0.408	0.093

注：原型中的“主体等”包含主体、围壳、升降舵和导管贡献；改型中的“主体等”包含主体、围壳和导管贡献。

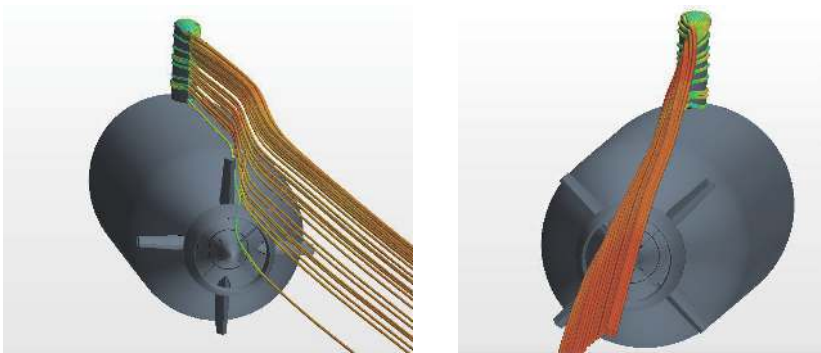


图 7 漂角为 2° 的流线图对比（左为原型；右为改型）

Fig. 7 Comparison of streamlines at drift angle +2° (left one is prototype configuration; right one is modified configuration)

表 8 正负舵角导数对比

Table 8 Comparison of derivatives between positive and negative stern plane angles

拟合范围	$1\,000Y_{\delta_r}'$	$1\,000N_{\delta_r}'$	$1\,000Z_{\delta_s}'$	$1\,000M_{\delta_s}'$
-15°~0°	3.068	-1.236	-4.125	-1.694
0~+15°	4.231	-1.700	-3.129	-1.225
偏差/% (大值/小值-1)	37.9	37.6	31.8	38.3

所示。由图可见,±15°舵角对应的压力面表面云图差别不大,但在吸力面,-15°舵角时的低压极

值、区域及梯度显著增加,使得负舵角下的舵导数明显增大。

3) 有动力两方案对比与无动力两方案对比的结论基本一致,即两方案的位置导数相当;相较原型方案,改型方案舵导数减小达 27% 以上。

4) 抽吸影响。参考表 6,表 9 给出了抽吸对两方案水动力导数的影响。由结果可见,螺旋桨抽吸使得位置力导数增大,矩导数减小;螺旋桨抽吸使得舵导数增大了约 15%~18%。总体而言,抽吸对两方案垂直面的影响较为显著。

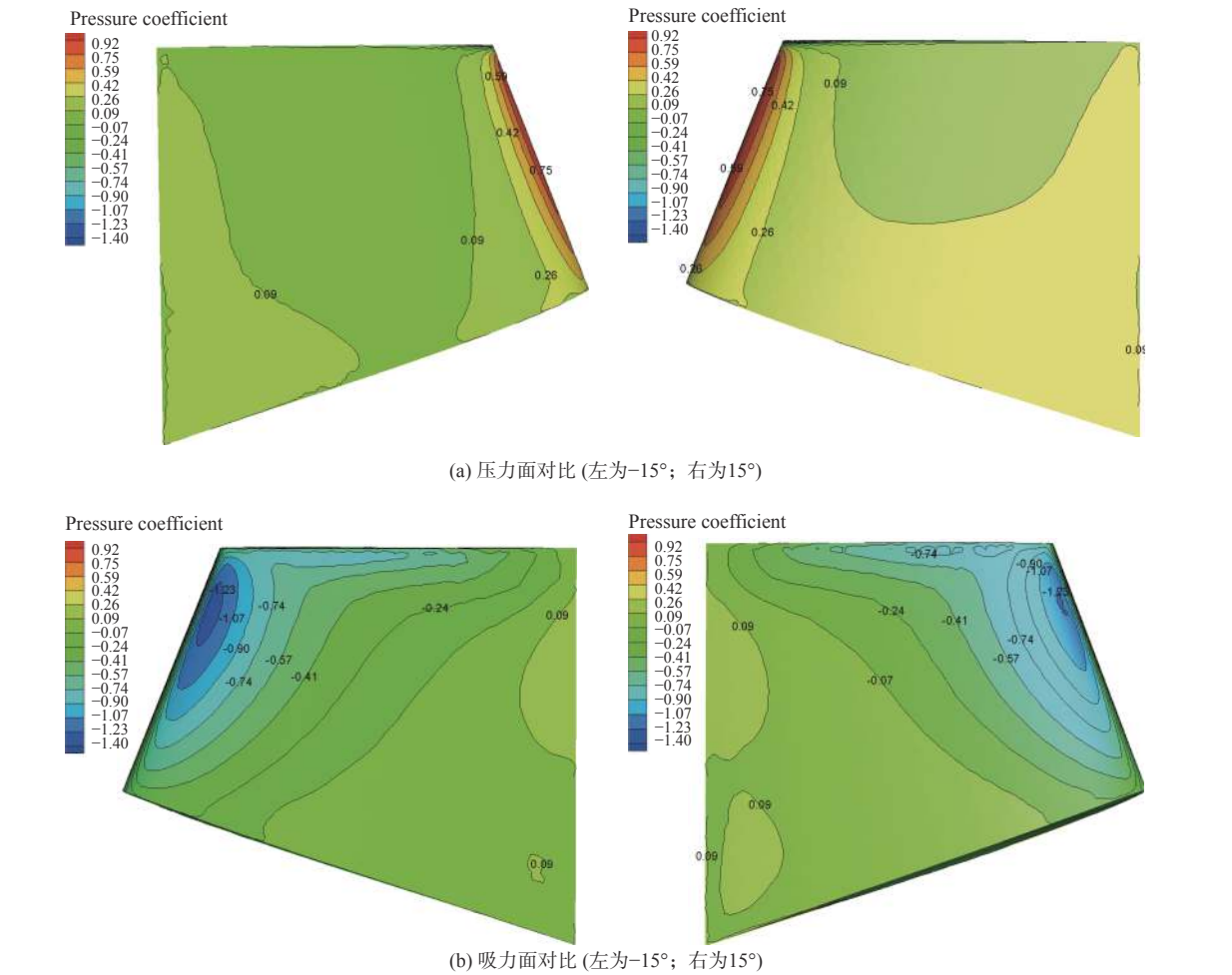


图 8 改型方案升降舵表面压力云图对比 (±15°)

Fig. 8 Comparison of pressure contours of stern plane surface for modified configuration (±15°)

表 9 抽吸对原型及改型方案水动力导数的影响		
Table 9 Pump effect on hydrodynamic derivatives of SUBOFF prototype and its modification		
水动力导数变化量	原型	改型
$1\ 000\Delta Y'_v$	-1.619	-1.843
$1\ 000\Delta N'_v$	0.664	0.773
$1\ 000\Delta Z'_w$	-2.548	-2.357
$1\ 000\Delta M'_w$	-0.988	-1.002
$1\ 000\Delta Y'_{\delta_r}$	0.780	0.610
$1\ 000\Delta N'_{\delta_r}$	-0.316	-0.221
$1\ 000\Delta Z'_{\delta_s}$	-0.917	-0.557
$1\ 000\Delta M'_{\delta_s}$	-0.397	-0.202

4 结 语

以 SUBOFF 为原型, 针对舵面积相同的十字形及 X 形舵布局, 较为系统地开展了有、无动力作用下攻角、漂角及舵角(升降舵、方向舵)相关的操纵性水动力特性研究, 对比分析了不同舵布局方案的操纵性水动力特性差异。主要研究结论如下:

- 1) 相较十字形舵布局, X 形航行体水平面静不稳定系数略小, 垂直面静不稳定系数略大;
- 2) 相较十字形舵布局, X 形航行体操纵同侧两舵后的舵导数减小了约 27%; 区别于十字形舵布局, 受相邻两舵干扰的影响, X 形航行体垂直面、水平面的舵力特性随正、负舵角呈现出不同的线性度;
- 3) 计及螺旋桨抽吸后的两方案操纵性水动力特性对比与无动力时的结论一致;
- 4) 螺旋桨抽吸使得位置力导数增大, 矩导数减小; 抽吸使得舵导数增大了约 15%~18%; 总体而言, 抽吸对两方案垂直面的影响较为显著。

参考文献:

[1] MACKAY M. Wind tunnel experiments with a submarine afterbody model[R]. Technical Memorandum DRDC Atlantic TM 2002-194, 2003.

[2] BROGLIA R, DUBBIOSO G, ZAGHI S, et al. Analysis of a submarine manoeuvrability by numerical PMM tests[C]//European Conference on Undersea Defence Technology (UDT2014). Liverpool, England, 2014.

[3] ZAGHI S, DUBBIOSO G, BROGLIA R, et al. Virtual

- PMM and free running manoeuvring predictions of a submarine by CFD[C]//NAV 2015 18th International Conference on Ships and Shipping Research. Rotterdam, Netherlands: ATENA, Polytechnic School of University of Genoa and Technical University of Milan, 2015.
- [4] 张涛, 林俊兴. 潜艇 X 形舵和十字形舵等效舵角研究[J]. *船舶工程*, 2004, 26(5): 1–3.
ZHANG T, LIN J X. Study on the equivalent rudder angle between X type and cruciform rudders on submarine[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2004, 26(5): 1–3 (in Chinese).
- [5] 胡坤, 徐亦凡. 舵型对潜艇操纵特性影响的仿真分析[J]. *船舶工程*, 2005, 27(1): 41–45.
HU K, XU Y F. Simulation analysis of effect of submarine rudder type on maneuvering characteristics[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2005, 27(1): 41–45 (in Chinese).
- [6] 胡坤, 徐亦凡, 王树宗. 潜艇 X 舵发展概况及其操纵控制特性分析[J]. *中国造船*, 2007, 48(2): 130–136.
HU K, XU Y F, WANG S Z. X Rudder submarine's development history and the analysis of it's manipulative characteristic[J]. *Shipbuilding of China*, 2007, 48(2): 130–136 (in Chinese).
- [7] 吴军. 潜艇操纵面及操纵性能设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
WU J. Study on the design of the control surface and its maneuverability for the submarine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005 (in Chinese).
- [8] 张露, 肖昌润, 焦玉超. 十字舵与 X 舵潜艇的水动力性能数值比较[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(7): 24–28.
ZHANG L, XIAO C R, JIAO Y C. Numerical comparison on hydrodynamic performance of cross rudder and X rudder submarine[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(7): 24–28 (in Chinese).
- [9] RODDY R F. Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF Model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments[R]. Report DTRC/SHD-1298-08, 1990.
- [10] 李士强, 肖昌润, 曹植珩. 基于 STAR-CCM+ 的潜艇尾流场及水动力数值分析[J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(S1): 29–35.
LI S Q, XIAO C R, CAO Z J. Numerical analysis of wake flow and hydrodynamics for a submarine based on STAR-CCM+[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(S1): 29–35 (in Chinese).
- [11] 张亮, 李云波. 流体力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001.
ZHANG L, LI Y B. Hydrodynamics[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2001 (in Chinese).
- [12] 潘子英, 吴宝山, 沈泓萃. CFD 在潜艇操纵性水动力工程预报中的应用研究[J]. *船舶力学*, 2004, 8(5): 42–51.
PAN Z Y, WU B S, SHEN H C. Research of CFD application in engineering estimation of submarine maneuverability hydrodynamic forces[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2004, 8(5): 42–51 (in Chinese).
- [13] STAR-CCM+ Version 10.02 user guide[CD]. CD-adapco, 2015.