

文章编号: 1007-7294(2025)01-0023-08

# 基于知识封装的船舶阻力性能虚拟试验 流程研发及其应用效果分析

朱 锋<sup>1,2</sup>, 李胜忠<sup>1,2</sup>, 鲍家乐<sup>1,2</sup>, 梁 川<sup>1,2</sup>, 赵 峰<sup>1,2</sup>

(1. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2. 深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214082)

**摘要:** 本文依托“属性细分, 知识封装”的原则, 开展基于RANS方程的船舶阻力性能虚拟试验应用流程研究, 通过封装虚拟试验专家知识, 建立船舶阻力性能虚拟试验应用流程。该流程对标物理水池模型试验流程, 用户仅需输入试验对象几何曲面以及主尺度参数, 即可开展阻力性能精细预报工作。经大子样验证, 该流程预报精度高、效果好, 与传统CFD阻力数值计算相比, 可大幅提高船舶阻力性能的评估效率, 缩短船舶性能研发周期, 大幅降低应用门槛。

**关键词:** 阻力性能; 专家知识; 应用流程; 效益分析

中图分类号: U661.31+1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.01.003

## Development of virtual test process and application effect analysis of ship resistance performance based on knowledge encapsulation

ZHU Feng<sup>1,2</sup>, LI Sheng-zhong<sup>1,2</sup>, BAO Jia-le<sup>1,2</sup>, LIANG Chuan<sup>1,2</sup>, ZHAO Feng<sup>1,2</sup>

(1. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China; 2. Taihu Laboratory of Deep-sea Technological Science, Wuxi 214082, China)

**Abstract:** Based on the principle of "attribute subdivision and knowledge encapsulation", the application process research of virtual test of ship resistance performance based on RANS equation by encapsulating virtual test expert knowledge was carried out. The application process of virtual test of ship resistance performance was established and compared to the physical pool model test process. Precise prediction of resistance performance can be carried out by only inputting the geometric surface and the main scale parameters of test object, which has the characteristics of high prediction accuracy and good effect. Compared with the traditional CFD resistance numerical calculation, the evaluation efficiency of ship resistance performance is greatly improved, the research cycle of ship performance is shortened, and the barrier to entry is significantly lowered.

**Key words:** resistance performance; expert knowledge; application process; benefit analysis

## 0 引 言

2000年前后, 随着计算机技术的持续发展, CFD数值预报技术达到了一个很高的水平, 并出现了

收稿日期: 2024-07-22

作者简介: 朱 锋(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: 316419180@qq.com;

李胜忠(1980-), 男, 博士, 研究员。

一些功能强大的商用 CFD 软件,如 Fluent、CFX、Star-CCM、Oship 等,与传统物理水池模型试验相比,CFD 数值预报软件能够在保证预报结果精度满足工程要求的同时,还具有预报费用低、预报响应时间快等独特优势,特别是在船舶技术设计阶段,能满足设计师快速掌握设计对象总体性能的需求。然而,当前多数 CFD 数值预报软件依然有以下几个方面的弊端:软件专业性强,用户需要通过专业的学习和培训才能胜任相关 CFD 数值预报工作,很多功能的实现需要用户进行二次开发,例如 Fluent 软件在开展船舶阻力性能计算时,需要用户编译 UDF(User Defined Function)程序来实现船舶六自由度运动等;软件的前后处理门槛较高,前处理网格划分、数值计算参数配置以及后处理结果分析均将耗费大量的时间;软件的使用因人因事差异性较大,不同用户针对同一个对象,由于对计算问题的看法不一,其预报结果往往存在差异。

当前船舶总体性能的研究主要还是依赖国外大型商用软件,在结构安全方面主要使用 ANSYS 软件,在流体性能分析方面则使用 STAR-CCM 软件,这些功能强大的商用 CAE 软件能够解决大而全的问题,但如上文所述,软件的门槛较高,需要从业者潜心学习并熟练应用。计算机信息技术的飞速发展带来了新的模式创新,针对传统 CFD 数值预报软件中存在的痛点难点问题,中国船舶科学研究中心的赵峰首次提出了“属性细分,知识封装”<sup>[1-2]</sup>的思想,通过对象属性细分将研究问题分类,依托封装技术完成软件的开发和应用。本文借鉴该思想,在自研粘流求解器的基础上设计开发船舶阻力性能虚拟试验应用流程,该应用流程在使用上完全对标物理水池模型试验过程,另外针对传统 CFD 数值预报软件包含的三大环节中的专家经验知识进行了固化和封装,用户依托使用手册即可开展船舶阻力性能虚拟试验,与传统 CFD 软件相比,极大地降低了用户的使用门槛、缩短了预报周期,该应用流程的开发可为用户快速掌握设计船型阻力性能水平提供技术支撑,为将来船舶总体性能研发模式由传统的 TSE(Traditional System Engineering)模式转型升级为 MBSE<sup>[3-4]</sup>(Model Based System Engineering)思想的模式奠定基础。

## 1 研发思想和目标

应用流程的研发遵循“属性细分,知识封装”的思想,属性涵盖了对象属性和性能属性,本流程对象属性为水面光体船舶,性能属性为阻力性能。开发者首先对数值预报涉及的前处理网格划分、数值计算参数设置以及预报流场后处理等三个方面内容涉及的专家知识进行详细的分析,前处理网格划分主要聚焦网格划分难、网格生成难等问题;数值计算参数设置则关注水面船舶在哪些参数配置下能够实现高精度计算;预报流场后处理聚焦数据的处理以及流场的可视化展示等。通过对专家知识的固化和封装,消除因人因事带来的使用差异,最终形成一个管用、易用、好用并且经过充分验证的可信度高的虚拟试验应用流程,实现非专业人士按照简单操作步骤即可实现船舶阻力性能的精细化预报工作。图 1 为该应用流程<sup>[4]</sup>的研发思想图。

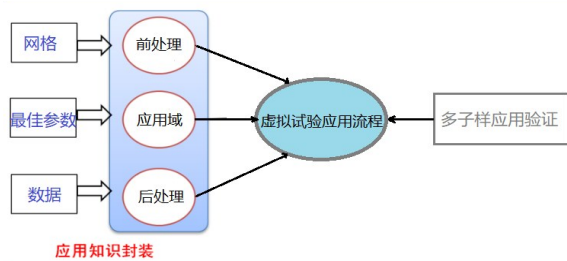


图 1 阻力性能虚拟试验应用流程研发思想  
Fig.1 Research and development idea of the concerned virtual test application process of resistance performance

本虚拟试验应用流程的开发目标有两个:(1)降低使用门槛,即非专业人员能够轻松上手完成目标对象的阻力性能虚拟试验,从而与传统 CFD 数值计算相比,大幅降低用户的使用门槛;(2)消除人事差异,即通过封装专家知识,用户无需开展繁琐的网格划分以及计算参数的配置,针对同一个虚拟试验对象,不同的使用者都能够实现虚拟试验结果的可复现。

## 2 研发过程

本应用流程的功能架构对标了物理水池模型试验过程,不仅可实现物理水池的模型试验功能,而且还能捕捉物理水池难以测量的流场信息。下面分别从物理水池试验流程、功能模块开发、专家知识封装以及架构界面设计四个方面对本应用流程的研发过程进行详细说明。

### 2.1 物理水池试验流程

为了对标物理水池模型试验,在开发设计虚拟试验功能架构前,首先对物理水池模型试验的主要操作过程进行梳理,物理拖曳水池试验通常分为以下五个步骤:

- (1) 试验大纲编制:包括试验来源、试验目的、试验对象、试验内容、数据处理方法、试验进度及人员安排等内容;
- (2) 加工木质船模:包括需要用户提供船体线型图或者船体曲面文件,船模车间依托提供的船型文件开展模型的加工;
- (3) 进行拖曳试验:包括试验前的破水、数据采集系统采集试验原始数据(不同吃水、不同航速下的阻力、升沉和纵倾值);
- (4) 试验数据处理:包括阻力数据、运动姿态数据的处理、实船有效功率换算以及视频影像资料的整理;
- (5) 阻力试验报告的编制。

本应用流程在功能的实现上严格对标上述物理水池试验流程,具体包括五个部分:制定虚拟试验方案、建模/网格划分、CFD求解器设置/计算、计算结果处理和计算报告编写。具体如图2所示。

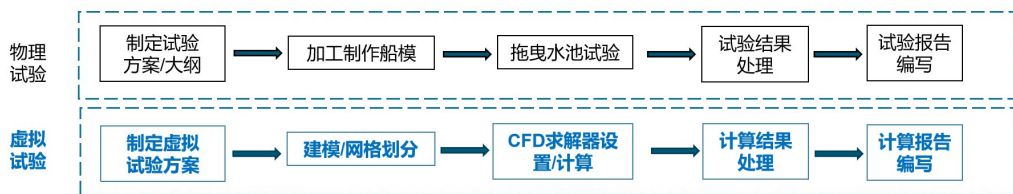


图2 物理水池试验流程和本虚拟试验流程对比

Fig.2 Comparison of work flows between the physical tank test and this virtual test application process

### 2.2 功能模块设计

对标上述物理水池试验流程,对本应用流程的功能界面进行了设计和开发,除满足用户使用需求外,尽量减少用户手动操作。经设计,本虚拟试验应用流程界面共分为五个应用模块,界面的开发框架如图3所示。

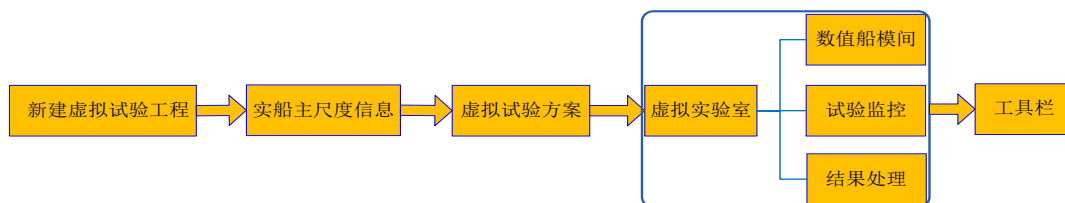


图3 虚拟试验流程界面开发框架

Fig.3 Interface development framework of virtual test application process

每个模块的功能实现如图4所示。

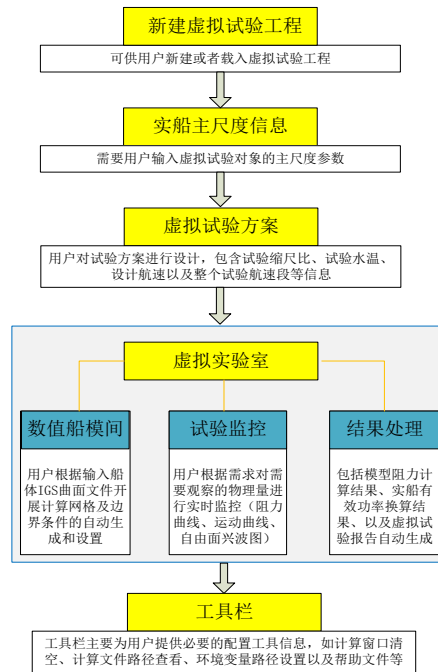


图 4 每个模块的功能实现流程图

Fig.4 Function realization flow chart of each module

### 2.3 专家知识封装

本应用流程所封装的主要专家知识涵盖虚拟试验涉及三个重点环节,包括前处理网格划分、数值计算最佳参数配置、试验结果后处理。下文将对每个环节涉及到的专家知识进行详细说明。

#### 2.3.1 前处理网格划分

在前处理环节主要依托商业软件 Pointwise,通过二次开发编译脚本文件的方式将原来需要用户手工操作的步骤自动化,关于网格划分包含的专家知识,具体有以下七个方面:船长标准化、网格划分方式、壁面网格间距、网格数量及疏密度、网格生成、网格边界条件以及最小航速对应的雷诺数  $Re$  值。

下文将对具体的专家知识进行逐一解读:

(1) 船长标准化:本虚拟试验将试验对象船长进行了标准化归一处理,即按照  $L_{pp}$  为基准进行归一化处理,计算船长=实际船长/ $L_{pp}$ 。

(2) 网格划分方式:本虚拟试验采用了结构化网格,包括船体贴体网格以及背景网格,均为结构化网格形式,通过重叠网格技术将船体贴体网格与背景网格进行重叠。

(3) 第一层网格高度  $\Delta y$  值:本流程按照最小航速  $V_{min}$  对应的壁面函数  $Y_{min}^+ = 35$  为基准进行物面第一层网格的计算,计算公式为:  $\Delta y = 8.721 \times Y^+ \times Re^{-0.9286}$ ,同时最大航速  $V_{max}$  对应的壁面函数  $Y_{max}^+$  不超过最小航速下  $Y_{min}^+$  值的三倍,即  $Y_{max}^+ \leq 3 \times Y_{min}^+$ ; (式中:  $\Delta y$  为第一层网格距离物面的高度,  $Y_{min}^+$  为计算最小航速对应的壁面函数值,  $Y_{max}^+$  为计算最大航速对应的壁面函数值,  $Re$  为雷诺数)。

① 网格数量及其疏密度:固化长度方向布置 150 个网格点,高度方向布置 80 个网格点,网格点在艏艉处按照  $1.5 \times 10^{-3}$  的间距设置网格疏密程度,船体表面面网格数量共计 1.2 万。

② 船体域网格外拓生长率、外拓步数以及域网格数量:在生成船体贴体网格时,船体网格的外拓生长率为 1.2,外拓步数为 35 步,外拓后的船体域网格数量为 42 万。

③ 背景网格与计算域网格数量:背景网格为长方体形式,长度方向布置 180 个网格点,宽度方向布置 60 个网格点,高度方向布置 80 个网格点,自由液面处上下网格疏密度为  $1.0 \times 10^{-3}$ ,整个背景网格数量为 86.4 万,采用重叠网格的方式将船体贴体网格和背景网格重叠合并,合并完成后的计算网格约为 100 万。

④ 模型缩尺比约束:考虑到模型最小航速  $V_{min}$  所对应的雷诺数  $Re$  数值不得小于  $5 \times 10^6$ ,若  $Re$  数值

小于上述阈值,将提示用户重新调整缩尺比,直到满足要求为止。

⑤ 网格质量检查及边界条件设置:在完成计算网格合并后,将自动检查网格质量,作为计算准入要求,船体网格不能出现负体积,满足要求后将自动生成计算域网格边界信息。

### 2.3.2 数值计算参数配置

本流程采用了基于RANS方程的自研粘流求解器,对船舶粘流计算软件Oship<sup>[5-6]</sup>进行功能模块分解及重塑升级,在此过程中将涉及数值计算参数配置方式、最佳参数等信息固化和封装:包括网格的分割、网格的运动控制属性、网格的转动属性、湍流模型的确定、自由液面处理方式、数值格式的确定以及压力求解方式等。

具体封装的知识如下:

- (1) 动量对流差分方式采用二阶迎风格式;
- (2) 自由液面的处理采用Level-Set方式;
- (3) 湍流模型采用SST  $k-\omega$ ;
- (4) 壁面函数选择多层模型;
- (5) 压力求解采用非定常Piso算法;
- (6) 预报运动的升沉与纵倾。

### 2.3.3 试验结果后处理

传统的CFD数值计算软件通常只输出基本的水动力数值,用户需要对原始数据作进一步分析和处理,流场的可视化功能也相对单薄,只能提供有限的流场图片。本虚拟试验应用流程依托图形处理软件Tecplot,通过对其进行二次开发,可实现流场信息的多视角展示。

具体封装的知识如下:

- ① 实现计算信息的自动读取,包括实时阻力信息、姿态信息以及实时流场信息等,并实现对上述计算信息的实时监控,在虚拟试验窗口中能够展示计算对象的阻力、姿态时程曲线以及自由面兴波图;
- ② 实现从虚拟试验阻力、运动姿态等原始数据到模型阻力性能参数的自动处理;
- ③ 实现自动给出模型对应的实船有效功率及实船的运动姿态等信息;
- ④ 实现不同航速、典型视角下自由面兴波的动画回放;
- ⑤ 实现虚拟试验报告的自动生成。

## 2.4 架构设计及界面开发

依托上文对本应用流程功能模块的设计,开展流程应用界面的开发,其设计的理念是方便用户的使用,界面逻辑简单、好上手。下面将整个虚拟试验的操作过程分为三个步骤:

第一步,创建虚拟试验工程,包括两个方面内容:(1)配置虚拟试验对象名称、主尺度参数等信息,配置虚拟试验方案,确定缩尺比、水温以及虚拟试验航速段;(2)导入虚拟试验曲面IGES文件,在数值船模车间中完成计算网格的自动划分。图5以标准模型DTMB5415为例,展示了该步骤下的配置情况。

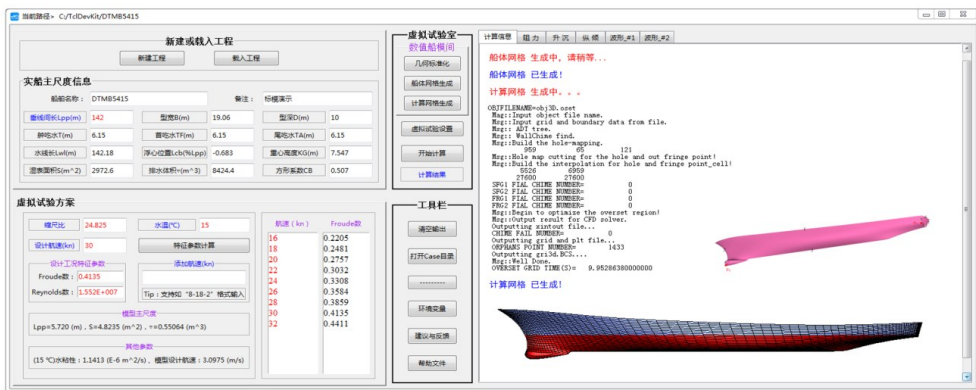


图5 应用流程界面开发

Fig.5 Interface development of the concerned application process

第二步,进行虚拟试验,包括不同航速下阻力、运动姿态的时程曲线以及不同视角下自由面的兴波图片。图 6 为标准模型 DTMB5415 虚拟试验进行中的监控画面。

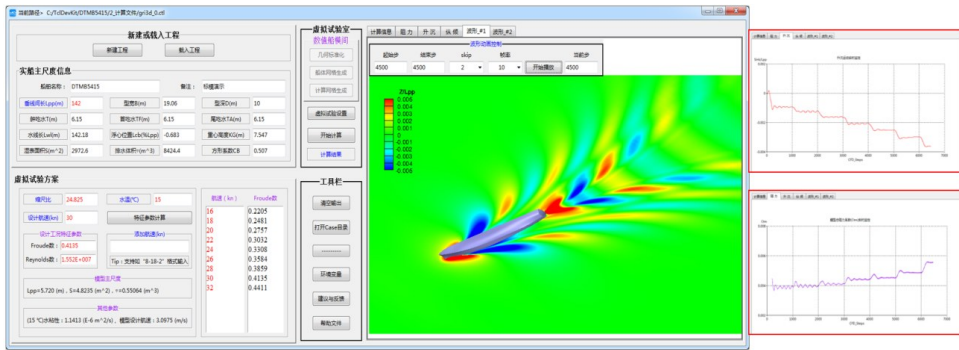


图 6 虚拟试验过程监控界面

Fig.6 Monitoring interface of the virtual test application process

第三步,虚拟试验结果处理,包括对阻力、升沉、纵倾等阻力性能参数的处理,自动获取模型阻力性能及对应的实船有效功率,同时可以自动生成阻力虚拟试验报告。图 7 为标准模型 DTMB5415 虚拟试验进行中的处理画面。



图 7 虚拟试验结果处理界面

Fig.7 Processing interface of virtual test results

### 3 应用效果分析

#### 3.1 大子样测试与验证

本文选取了 250 组水池模型试验数据,统计了全样本点不同航速段下本虚拟试验流程计算结果与水池试验结果的偏差分布情况,表 1 为测试结果与水池模型试验结果偏差分布统计。

表 1 测试结果与水池试验结果偏差分布

Tab.1 Deviation distribution of virtual test results and tank test results

偏差 (%)	数量	比例 (%)	偏差 (%)	数量	比例 (%)
-6~-5	3	1.20	0~1	47	18.80
-5~-4	6	2.40	1~2	40	16.00
-4~-3	9	3.60	2~3	20	8.00
-3~-2	25	10.00	3~4	5	2.00
-2~-1	40	16.00	4~5	4	1.60
-1~0	50	20.00	5~6	1	0.40

由表1可知:在所统计的250组样本中,有222个样本点(88.8%)的测试结果与水池试验结果的偏差在3%以内,另外设计航速点测试结果偏差在3%以内的概率为95%。图8为测试结果与试验结果之间的正态统计及偏差分布曲线<sup>[7]</sup>。

### 3.2 用户体验

表2给出了本虚拟试验应用流程在自主知识产权以及用户使用友好程度上与主流商用CFD软件的对比。

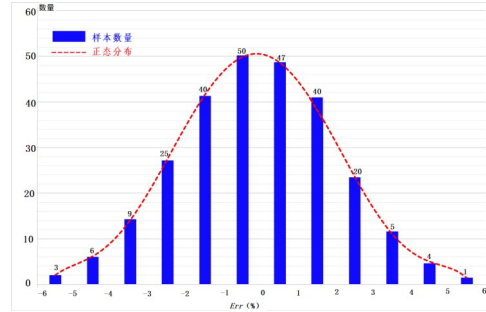


图8 测试结果与水池试验结果的正态统计及偏差分布曲线  
Fig.8 Normal statistics and deviation distribution of virtual test results and tank test results

表2 本应用流程与商用软件部分功能对比

Tab.2 Partial functional comparison of this application process and some commercial softwares

预报工具	自主知识产权		前处理网格划分		计算最佳参数配置		计算结果后处理	
	有	无	手动	自动	手动	自动	手动	自动
Star-CCM		√	√		√		√	
Fluent		√	√		√		√	
CFX		√	√		√		√	
本虚拟试验流程	√			√		√		√

经对比可知,本应用流程与主流商用CFD软件相比在多个方面都具有较大的优势,特别是在前处理、数值计算以及后处理方面,具备了自动化处理能力,尤其是在前处理网格划分方面,将网格划分的专家知识封装入本流程后,能够实现计算网格的自动生成,使得不具备CFD知识的船舶设计工作者也能够开展船舶阻力性能的精细化预报工作,大幅降低了用户的使用门槛。表3为本应用流程与商用软件在前后处理耗时方面的对比情况。

表3 本应用流程与商用软件前后处理耗时对比

Tab.3 Comparison of pre- and post-processing time between this application process and commercial software

应用过程	本虚拟试验应用流程	商用CFD软件	节省时间
数值计算(CPU16核)	2 h/航速点	3 h/航速点	33%
前处理(人工)	0.25 h	3 h	91%
后处理(人工)	0.25 h	8 h	97%

由表可知,本应用流程在前后处理耗时上较商用软件分别减小了91%和97%,工作效率得到了显著提升。

## 4 结 语

本文建立了基于“属性细分,知识封装”的船舶阻力性能虚拟试验应用流程。该应用流程与主流商用CFD数值计算软件相比,在用户体验、自动化程度以及计算效率方面得到了大幅提升,降低了用户的使用门槛,消除了因人因事的差异,实现了非专业人员也能够快速上手完成相关工作的目标。该虚拟试验流程的研发,为船舶设计人员在技术设计阶段快速掌握所设计船舶的阻力性能以及周围流场信息提供了新的技术手段,也为开展其它水动力性能虚拟试验流程的研发奠定了技术基础。

## 参 考 文 献:

- [1] 赵 峰, 陈伟政, 韦喜忠. 系统工程在船舶总体性能研发中的实践思考[J]. 中国造船, 2021, 62(2): 275–283.  
Zhao Feng, Chen Weizhen, Wei Xizhong. A system engineering based approach to enhance ship general performance[J]. Shipbuilding of China. 2021, 62(2): 275–283.
- [2] 李胜忠, 梁 川, 赵 峰. 基于MBSE的船型与水动力性能研究设计模式探讨[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(8): 1–5.  
Li Shengzhong, Liang Chuan, Zhao Feng. Discussion on the design pattern of hullform and hydrodynamic performance based on MBSE[J]. Ship Science and Technology. 2021, 43(8): 1–5.
- [3] 贾晨曦, 王林峰. 国内基于模型的系统工程面临的挑战及发展建议[J]. 系统科学学报. 2016, 24(4): 100–104.  
Jia Chenxi, Wang Linfeng. Challenges and development suggestions of the model based systems engineering in China[J]. Journal of Systems Science. 2016, 24(4): 100–104.
- [4] Nichols D, Lin C. Integrated model-centric engineering: The application of MBSE at JPL through the life cycle[R]. Los Angeles, CA: INCOSE, 2014.
- [5] 周秀红, 赵发明, 王丽艳. 船舶粘流计算软件“OShip”开发[J]. 中国造船, 2014, 55(1): 90–103.  
Zhou Xiuhong, Zhao Faming, Wang Liyan. Development of software “OShip” for open/overlap ship viscous calculation [J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(1): 90–103.
- [6] 朱 锋, 李胜忠, 侯小军. 基于CFD的“探索一号”科考船多波束测深仪安装方式研究[J]. 中国造船, 2018, 59(2): 190–197.  
Zhu Feng, Li Shengzhong, Hou Xiaojun. Research on the installation of acoustic equipment on the “Exploration 1” scientific research ship[J]. Shipbuilding of China. 2018, 59(2): 190–197.
- [7] 吴乘胜, 邱耿耀, 魏 泽, 等. 船模阻力数值水池试验不确定度评估[J]. 船舶力学, 2015, 19(10): 1197–1208.  
Wu Chengsheng, Qiu Gengyao, Wei Ze, et al. Uncertainty analysis on numerical computation of ship model resistance[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(10): 1197–1208.