

8-15-2022

Realization of Domestic Ship Hydrodynamic Numerical Software on Industrial Cloud Platform

Yingyan Zhao

1.College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;, zhaoyingyan2010@163.com

Qunsheng Cao

1.College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;, qunsheng@nuaa.edu.cn

Zhengnan Cao

2.Shuguang Information Industry Co. , Ltd. , Beijing 100193, China;

Jianchun Wang

3.Wuxi Orient Software Technology Co. , Ltd. , Wuxi 214000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Realization of Domestic Ship Hydrodynamic Numerical Software on Industrial Cloud Platform

Abstract

Abstract: Developing the user-friendly cloud platform for high-performance numerical software deployment has great engineering significance. *Based on the high performance computing resource of Web industry cloud platform, the large-scale high performance test on the domestic ship hydrodynamics numerical software is carried out.* Selecting a typical Knock Nevis KCS model with a bulbous bow, through the parallel solver of the software, the wave-making problem of a real ship is simulated, in which the wave shape near the actual ship hull is basically consistent with that of the real ship. *The successful test of a typical application scenario of the domestic ship hydrodynamics numerical software on the industrial cloud platform provides a powerful and controllable simulation tool for the study of ship navigation wave-making.*

Keywords

high performance numerical software, industrial cloud platform, ship hydrodynamics, ship navigation wave-making, engineering simulation

Recommended Citation

Yingyan Zhao, Qunsheng Cao, Zhengnan Cao, Jianchun Wang. Realization of Domestic Ship Hydrodynamic Numerical Software on Industrial Cloud Platform[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1855-1863.

国产船舶水动力数值软件在工业云平台的实现

赵英燕¹, 曹群生^{1*}, 曹振南², 王建春³

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 211106; 2. 曙光信息产业股份有限公司, 北京 100193;
3. 中船重工奥蓝托无锡软件技术有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 研制适应于高性能数值软件部署和用户使用便捷的云平台, 对于软件的研发和应用具有重要的工程意义。基于Web工业云平台的高性能计算资源, 对国产船舶水动力学数值软件进行大规模高性能测试工作。通过选取典型的带球鼻艏的集装箱船KCS(kriso container ship)计算模型, 采用该软件并行求解器模拟实际船型的航行兴波问题, 达到与实际船体附近波形基本一致。国产船舶水动力学数值软件在工业云平台上的典型应用场景的成功测试, 为研究船舶航行兴波问题提供了有力的自主可控国产工程仿真工具。

关键词: 高性能数值软件; 工业云平台; 船舶水动力学; 航行兴波; 工程仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)08-1855-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0497

Realization of Domestic Ship Hydrodynamic Numerical Software on Industrial Cloud Platform

Zhao Yingyan¹, Cao Qunsheng^{1*}, Cao Zhengnan², Wang Jianchun³

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Shuguang Information Industry Co., Ltd., Beijing 100193, China; 3. Wuxi Orient Software Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: Developing the user-friendly cloud platform for high-performance numerical software deployment has great engineering significance. Based on the high performance computing resource of Web industry cloud platform, the large-scale high performance test on the domestic ship hydrodynamics numerical software is carried out. Selecting a typical Knock Nevis KCS model with a bulbous bow, through the parallel solver of the software, the wave-making problem of a real ship is simulated, in which the wave shape near the actual ship hull is basically consistent with that of the real ship. The successful test of a typical application scenario of the domestic ship hydrodynamics numerical software on the industrial cloud platform provides a powerful and controllable simulation tool for the study of ship navigation wave-making.

Keywords: high performance numerical software; industrial cloud platform; ship hydrodynamics; ship navigation wave-making; engineering simulation

引言

随着科学技术的快速进步, 数值仿真已成为除理论、实验之外的第三大科学研究手段。得益

于计算机^[1]的飞速发展, 高性能计算应用水平已成为衡量和驱动一个国家、地区综合竞争力与创新能力的重要指标之一^[2]。数值模拟软件在高端装备

收稿日期: 2022-05-13 修回日期: 2022-07-29

第一作者: 赵英燕(1987-), 女, 博士生, 研究方向为国产高性能数值软件的工业云平台的实现与性能评估等。

E-mail: zhaoyingyan2010@163.com

通讯作者: 曹群生(1959-), 男, 博士, 教授, 研究方向为高性能计算电磁方法, 超材料和频率选择表面, 天线和天线罩设计等。

E-mail: qunsheng@nuaa.edu.cn

物理研究、惯性约束聚变、全球气候变化、电磁环境与信息安全、生命科学等多个领域的研究中起到越来越重要的作用, 依托于高性能计算的数值模拟应用软件研制已经成为高性能计算(high performance computing, HPC)应用领域的研究热点^[3-4]。工业云平台(industrial cloud platform, ICP)软件, 整合全国多个计算中心形成互联互通, 实现应用软件开发、集成、服务等范式创新的新模式^[5-6]。采用云计算的方式整合不同时期、不同地域建设的不同种高性能计算中心资源, 根据高校、科研院所、制造企业等计算工业领域用户提出的计算算力需求, 搭建统一计算服务平台, 支持跨区域和多中心的计算资源、算例数据、应用软件等资源协同, 实现资源一体化高效协同调度, 以公有云应用的模式提供服务, 建立安全可信的仿真云安全体系, 保障数据、应用、业务安全, 从传输、数据等多维度设置安全机制确保数据安全, 并可根据用户实际需求定制服务。ICP主要解决了在异构平台下多HPC集群间的作业调度^[7]问题, 用户可以通过计算服务平台提供的统一界面访问和使用不同平台、不同地域的高性能计算中心资源, 提供高性能计算资源的云服务, 有效整合异构高性能计算资源, 提高高性能计算资源的利用率。在工业云平台上运行高性能数值软件是衡量各国竞争能力的一个重要的指标之一, 我国也不例外。

在国内水动力学领域中, 计算模拟带球鼻艏的集装箱船KCS(kriso container ship)的航行兴波^[8]问题以往依赖于相关的国外商用水动力学CFD软件。国产高性能数值软件的快速研制为国内模拟工程应用场景提供了有力自主研发^[9]的工程计算^[10]仿真工具, 为高性能计算机协调发展和高性能计算应用领域亟待解决的瓶颈问题提供了有力的解决途径。

本文主要研究自主开发的水动力学CFD软件NaViiX^[11](naval hydrodynamics oriented CFD solvers)

的基本特性, 实现了工业云平台上的首次应用。通过对带球鼻艏的集装箱船KCS水面波形的仿真计算, 为国产水动力学CFD软件真正应用开拓了方向, 为国产化水动力学解决大型目标奠定了基础。

1 工业云平台系统架构

ICP系统架构包括资源层(IaaS)、平台层(PaaS)和用户层(SaaS)。资源层包含集群软硬件计算环境; 平台层包含平台基础功能、工业应用软件、集群调度和运维软件等; 用户层指用户端工业制造领域应用场景。

ICP基于B/S架构设计, 使用Java语言开发, 支持前后端分离。Tomcat作为Web容器, Mysql作为系统核心数据库, 基于SSO进行用户统一认证, 基于nginx技术实现负载均衡和高可用。支持Eshell命令行和Efile文件传输功能, 同时集成了快传功能^[12]。

ICP访问层面可以通过常见主流浏览器访问, 如Firefox、Chrome、Safari等, 支持Windows、Mac操作系统访问, 亦支持客户端形式访问。平台底层支持X86等多种异构^[13]硬件资源调度, 提供工业计算服务。

ICP系统总体架构如图1所示。

2 船舶水动力学软件在ICP的实现

国产船舶水动力学软件采用船舶水动力学CFD求解器, 该求解器能够实现三维航行体单相、两相(带自由面)湍流绕流CFD模拟; 支持结构化网格、非结构化网格、混合网格、任意多面体网格、交界面网格以及滑移网格; 支持RANS、DES、LES算法, 支持标准 $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 、SST $k-\omega$ 湍流模型, Smagorinsky以及WALE等亚格子(SGS)应力模型等^[14]; 支持惯性坐标系、非惯性坐标系和多参考坐标系求解; 支持MPI(message passing interface)并行计算^[8]。

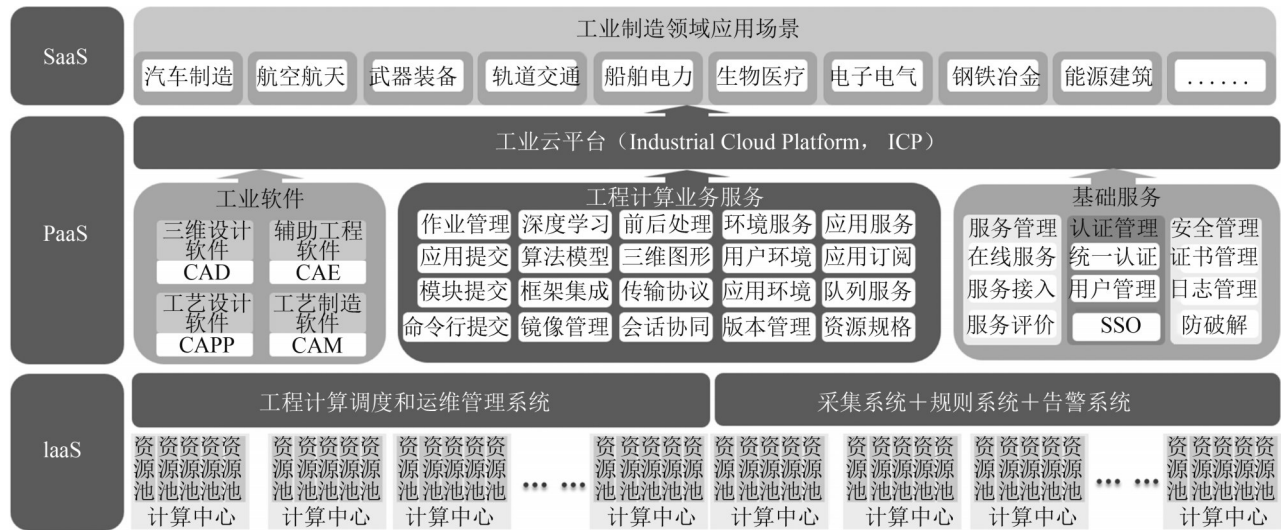


图 1 ICP 系统架构图
Fig. 1 ICP system architecture

NaViiX 软件架构见表 1, 自底向上分别是主函数(程序流程控制器)、数学物理模型算法库(湍流模型、自由面模型、六自由度运动、速度压强解耦算法)、定界条件(初边值设定)、数值离散格式(迎风、中心、高阶等)、线性代数方程组解算库(变量求解的高性能数学库)、各类工具包(矢量及矩阵运算), 以及用户算例操作手册。

NaViiX 软件在 ICP 上申请流程见图 2, 具体 NaViiX 软件求解计算流程分为 3 个部分, 即前处理、求解和后处理。其中前处理主要是准备运行时所需要的 3 个文件, 即网格文件(.cas)、材料属性文件(.mtl)和参数控制文件(.par); 求解过程是采用运行指令运行 NaViiX 软件; 后处理过程则是将输出的结果在可视化软件中进行处理, 形成可视化结果。

本次测试, NaViiX 软件在硬件平台选择方面选用 8 个计算节点, 并行核心数为 250 核, 内存 256 G, 100 Gb/s 高速网络。采用操作系统 Centos 7.5。并行环境为 Intel_compiler_composer_xe_2017.5.239, intelmpi-2017.4.239。

选用 KCS 带球鼻艏的集装箱船算例在 ICP 上开展 NaViiX 软件水面波形计算的并行测试与验证工作。由于算例是国际标模, 广泛应用于 CFD 的计算验证, 因而几何构型易于获得, 已有大量的

表 1 NaViiX 软件架构
Table 1 NaViiX software architecture

| 模块 | 子模块 | 模型类别 |
|--------|---|-------------------|
| 接口函数 | 前处理 | |
| | 后处理 | |
| | 工具包 | |
| 数学库 | 用户算例 | |
| | METIS 并行分区库 | |
| | YHAMG 求解库 NaViiXMath 数学库 | |
| 数值离散格式 | 离散方法 | |
| | 网格场域量 | |
| | 动量方程 压力修正方程 初边值条件 | |
| 模型算法 | | RNG k-ε k-ε |
| | RANS 湍流模型 | k-ω |
| | | SST k-ω |
| | | SST k-ω DES |
| | | Smag |
| | LES 亚格子模型 | SmagLilly WALE |
| | | AWMLES |
| | 多相流 VOF 物理模型 六自由度运动 DoF 模型 NaViiX.c(程序主要函数) | |

实验研究和数值计算数据可用于应用验证的结果比对^[15]。本次测试计算流程如图 3 所示，用 SIMPLE 预估-校正算法实现速度场与压强场之间的解耦，非定常多相流计算既包含了稳态问题的

内迭代计算，也包含了随时间变化过程的非稳态的外迭代计算 2 部分内容，内迭代次数用 *iter* 参数表示，外迭代时间步用 *T* 参数表示。

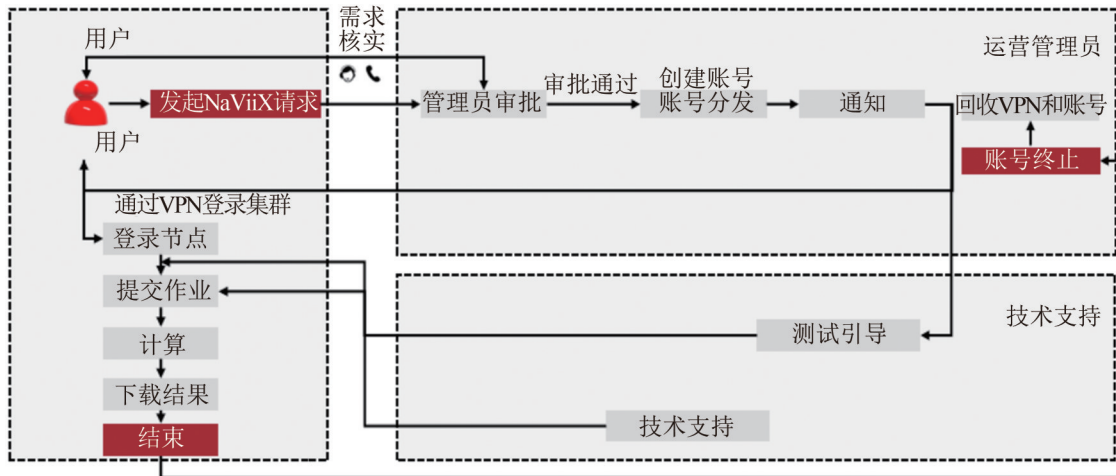


图 2 NaViiX 软件在 ICP 上申请流程
Fig. 2 NaViiX software on ICP application process

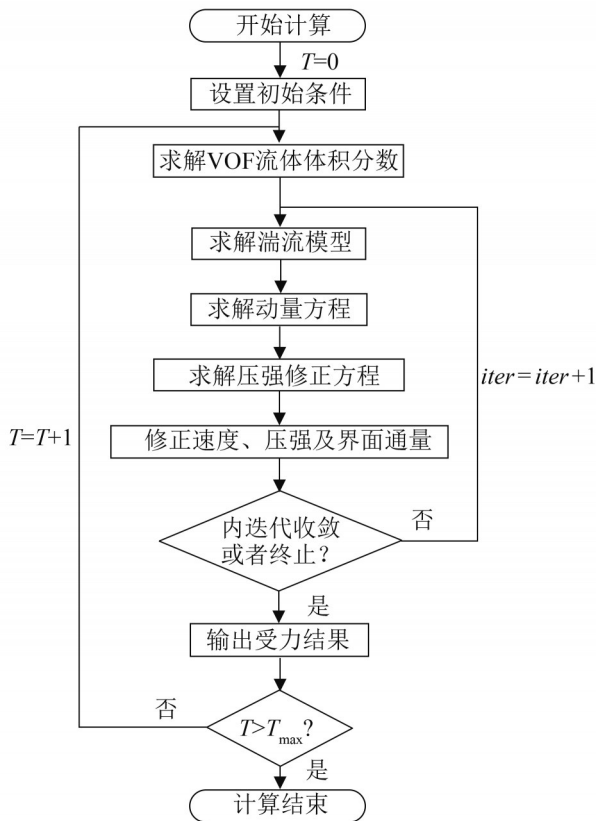


图 3 NaViiX 软件自由面波形捕捉流程
Fig. 3 NaViiX software free surface waveform capture flow diagram

由于目前版本的 NaViiX 软件高性能并行求解器主要针对 X86 架构开发设计，分析其主要实现过程和组成构件，主要有如下关键技术点：

(1) NaViiX 软件依赖于第三方高性能数值解算库，对于解算库的跨平台移植需要进行测试。

为了实现 NaViiX 软件的快速并行化，引入了诸如 BLAS、LAPICPK 等著名的第三方高性能解算库，而这些库目前仅实现了基于 X86 架构处理器的移植，而跨平台移植时，可能会由于编译器版本、语法、指令等不同带来新的问题。

(2) 研究 NaViiX 软件与 ICP 软件的编译系统和运行指令的适配性。

由于不同的超算平台其编译系统不一致，在 ICP 软件上，有独立的作业调度和编译系统以及运行指令，研究过程发现一个很明显的问题就是不适配的 MPI 编译器会导致 NaViiX 软件无法实现跨节点并行，因而有必要开展 NaViiX 软件基于 ICP 软件的编译系统和运行指令的适配性。

图 4 是 NaViiX 软件在解决实际问题中的技术流程图。其中，NaViiX 软件所需依赖库的方法是

在 Linux 系统中撰写动态库打包指令 pICPk.sh, 具体内容如下:

```
#!/bin/sh
exe="NaViiX"
des="/home/export/online3/amd_702wcs/wangjc/example"
deplist=$(ldd $exe | awk '{if (match($3, "/")) {printf("%s "),$3 } }')
cp $deplist $des
#!/bin/sh
exe="NaViiX"
des="/home/export/online3/amd_702wcs/wangjc/example"
deplist=$(ldd $exe | awk '{if (match($3, "/")) {printf("%s "),$3 } }')
cp $deplist $des
```

上述代码中, 第 1 行中的“#!/bin/sh”是指此脚本使用/bin/sh来解释执行, #!是特殊的表示符, 其后面跟的是解释此脚本的 shell 的路径; 第 2 行中的“exe="NaViiX"”表示可执行软件的名称为 NaViiX; 第 3 行中的“des="/home/export/online3/amd_702wcs/wangjc/example"”表示 NaViiX 软件的存放位置; 第 4、5 行中的“deplist”为所有依赖的动态库的内容, “cp \$deplist \$des”表示把 NaViiX 软件所依赖的第三方库都存放在软件所在地。

将上述第三方依赖库及 NaViiX 软件作为输入, 导入至 ICP 中, 运行典型 KCS 计算模型算例。

若能成功运行, 则说明软件及其第三方依赖库能够与 ICP 服务平台相匹配; 如果不能成功运行, 则说明软件第三方库或者 MPI 编译器选择有问题。通过 ldd NaViiX 指令进一步查看 NaViiX 第三方库是否全覆盖了, 同时开展跨核组的 MPI^[16]并行测试, 通过筛选合适的编译器及编译参数设置来解决因为跨平台时 MPI 编译器不同带来的问题。

通过本次测试, NaViiX 软件发现 ICP 平台能够提供第三方依赖库所需的底层动态库(图 5), 如 libmpi.so.12。测试结果表明: NaViiX 软件所需的依赖库(如 Metis 网格划分数学库)均能够成功运行在 ICP 上, 为实现 NaViiX 软件在 ICP 上大规模并行计算奠定了技术基础。

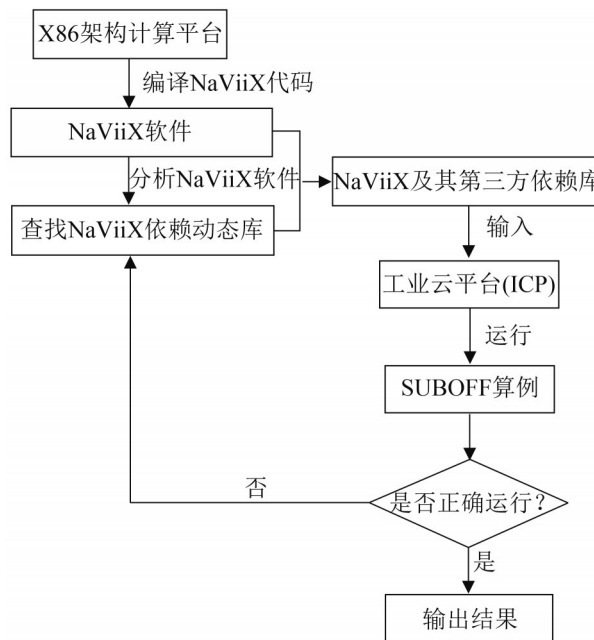


图 4 NaViiX 软件与 ICP 适配性流程
Fig. 4 NaViiX software and ICP compatibility process

```
[jiancw@login07 NaViiX_VOF]$ ldd NaViiX
linux-vdso.so.1 => (0x00007ffc68952000)
libm.so.6 => /usr/lib64/libm.so.6 (0x00002af4c7d3b000)
libgfortran.so.3 => /usr/lib64/libgfortran.so.3 (0x00002af4c803d000)
libquadmath.so.0 => /usr/lib64/libquadmath.so.0 (0x00002af4c835f000)
libdl.so.2 => /usr/lib64/libdl.so.2 (0x00002af4c859b000)
libmpi.so.12 => /public/software/mpi/intelmpi/2017.4.239/intel64/lib/libmpi.so.12 (0x00002af4c879f000)
libc.so.6 => /usr/lib64/libc.so.6 (0x00002af4c94d5000)
/lib64/ld-linux-x86-64.so.2 (0x00002af4c7b17000)
libgcc_s.so.1 => /usr/lib64/libgcc_s.so.1 (0x00002af4c98a2000)
librt.so.1 => /usr/lib64/librt.so.1 (0x00002af4c9ab8000)
libpthread.so.0 => /usr/lib64/libpthread.so.0 (0x00002af4c9cc0000)
```

图 5 依赖库的底层动态库在 ICP 上的地址
Fig. 5 Depends on address of underlying dynamic library on ICP

3 典型模型的仿真与验证

将NaViiX软件部署在ICP上,通过ICP平台链接应用软件、调度软件和底层算力资源,对KCS模型进行仿真与验证。

KCS是一艘带球鼻艏的集装箱船(实船未建造),由韩国船舶与海洋工程研究所设计,是典型的中高速中等方形系数船型。该船型是船舶水动力性能研究的国际标准模型,广泛应用于CFD的测试验证。船模几何外形如图6所示,主尺寸参数见表2。

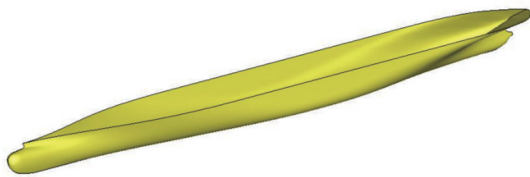


图6 典型KCS船舶几何模型

Fig. 6 Sketch map of geometric model of typical KCS ship

表2 带球鼻艏的集装箱船KCS主尺度参数

Table 2 Principal dimension parameters of knock nevis KCS with bulbous bow

| 参数 | 实船 | 模型 |
|--------------|---------|---------|
| L_{pp}/m | 230.0 | 7.278 6 |
| L_{wl}/m | 232.5 | 7.357 7 |
| B_{wl}/m | 32.2 | 1.019 0 |
| T/m | 10.8 | 0.341 8 |
| S_w/m^2 | 9 424 | 9.437 9 |
| ∇/m^3 | 52 030 | 1.649 0 |
| C_B | 0.650 5 | 0.650 5 |

表2中, L_{pp} 为垂线长(垂线长是表示船舶长度的一种,是指在标准吃水时,首垂线和尾垂线在船长方向的长度)。 L_{wl} 为水线长(也称为设计水线长,是船舶设计水线平面与船体型表面首尾端交点之间的水平距离,是船舶主尺度中船长的一种)。 B_{wl} 为水线宽(水线宽是指设计水线平面处,船体型表面之间垂直于中线面的最大水平距离。设计水线宽是船舶设计中的主要宽度,通常也是首先选定的宽度)。 T 为吃水(船舶浸在水里的深度)。 S_w 为船舶湿表面积(船体湿表面积,亦称“浸水面积”。船体在静浮状态时浸没在水中的船体表面的面积)。 ∇ 为

排水体积(船舶排开水的体积)。 C_B 为方型系数(方形系数是指与基平面相平行的任一水线面以下的船的型排水体积与对应的船长、型宽和平均吃水的乘积所表示的长方体体积之比)。

雷诺数 Re 和弗洛德数 Fr 是船模实验相似准则的2个重要的无量纲参数,其中雷诺数表征流体的惯性力与粘性力之比,弗洛德数则表征流体惯性力与重力之比。雷诺数和弗洛德数的计算公式为

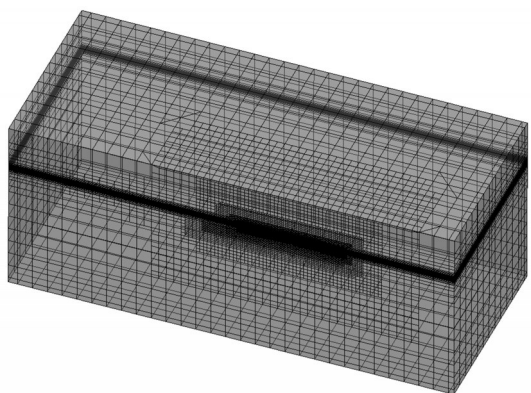
$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

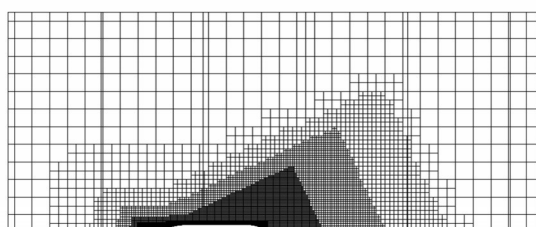
式中: ρ 为流体密度; v 为特征速度(本文采用均匀来流速度); L 为特征长度(本文选用船体垂线间长度 L_{pp}); μ 为流体粘性系数; g 为重力加速度。数值模拟计算针对KCS船模设计吃水状态下2.196 m/s航速开展($Re=1.4 \times 10^7$, $Fr=0.26$)。

图7为计算域网格分布计算域设置如下:上游入口距船舶 $1.3 L_{pp}$,下游出口距船艉 $2.2 L_{pp}$,侧方距离船体 $1.7 L_{pp}$,下方距船体 $1.3 L_{pp}$;由于船模和计算问题具有对称性,在数值模拟中只需计算一半区域,船模中纵剖面设置为对称面。计算总体网格数为59万,设置时间步长为0.001 s,采用24核并行求解200 s(20 000个外迭代)。

图8为计算时间为200 s的瞬时自由面波形。从图8可以看出,随着水流过船体表面,自由面在船体周围呈现明显波峰和波谷现象,船体两侧波纹呈现一定的夹角。KCS船舷侧波高与实验对比结果如图9所示,图中EFD代表的是实验测量结果^[17],为了方便与实验值对比,参考实验数据,对波形尺度参数做了无量纲处理,其中特别说明, $x/L_{pp}=0$ 为船艏, $x/L_{pp}=0.5$ 为船舳, $x/L_{pp}=1$ 为船艉。图9可知在船艏位置捕捉的波峰较低,船体肩部、船舳部和船艉部的波峰较高,船艉前方的波谷较深,存在轻微的相位差,图9还可以看出本文采用的数值计算方法计算得到的船舷处波高与实验测量结果一致。



(a) 计算域整体网格



(b) 船体附近网格

图7 59万网格KCS船模算例计算域网格
Fig. 7 590 000 grid computing domain diagram of KCS ship model example

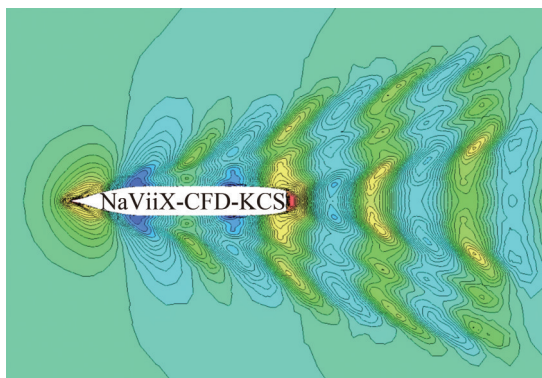


图8 200 s瞬时KCS水面船波形计算结果
Fig. 8 Calculation results of 200 s instantaneous KCS surface ship waveform

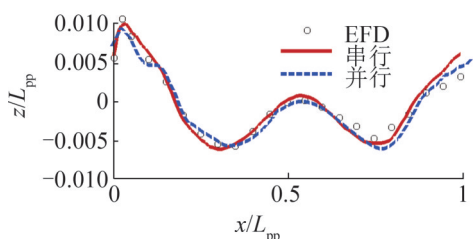


图9 KCS船舷侧波高与实验对比结果
Fig. 9 Comparison of side wave height of KCS ship with experimental results

为了对模拟结果更好地量化分析, 不仅对KCS舷侧波形进行了数值计算和实验的比较, 还在船体外侧区域截取了3个剖面上($y/L_{pp}=0.0741$ 、 $y/L_{pp}=0.1509$ 、 $y/L_{pp}=0.4224$)的波形数据, 并和模型实验结果(图中EFD数据)进行对比, 结果见图10~12。

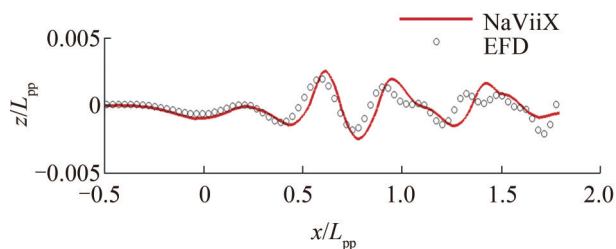


图10 船侧 $y/L_{pp}=0.0741$ 位置兴波模拟和实验对比
Fig. 10 Wave-making simulation and experimental comparison of ship side $y/L_{pp}=0.0741$

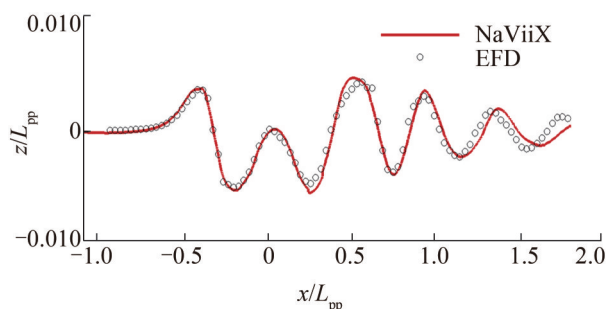


图11 船侧 $y/L_{pp}=0.1509$ 位置兴波模拟和实验对比
Fig. 11 Wave-making simulation and experimental comparison of ship side $y/L_{pp}=0.1509$

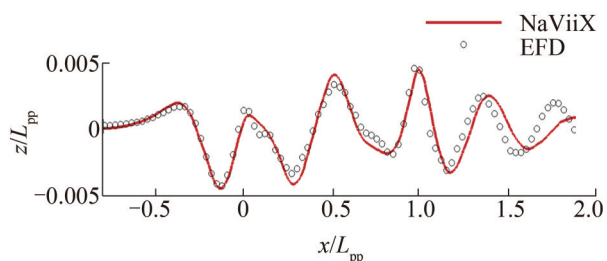


图12 船侧 $y/L_{pp}=0.4224$ 位置兴波模拟和实验对比
Fig. 12 Wave-making simulation and experimental comparison of ship side $y/L_{pp}=0.4224$

图10给出了 $y/L_{pp}=0.0741$ 位置的波形模拟结果。从图10可以看出: 求解器算法对船体长度范围内的波形捕捉准确, 但舦部和舦后部的波幅略有偏小, 船体后方的波形有一定相位偏差。分析

可知，这与网格沿着船体后方逐渐变稀疏直接相关。

图11则给出了 $y/L_{pp}=0.1509$ 位置的波形模拟结果。从图11可以看出：除计算域出口位置附近外，求解器算法模拟的波形与实验结果基本吻合，波形特征捕捉基本准确。

图12给出了 $y/L_{pp}=0.4224$ 位置的波形模拟结果。从图12可以看出：相比于实验测量结果，求解器算法从船艏位置开始，捕捉到的波形与实验结果基本一致，出口附近波形存在一定相位差，说明求解器算法有一定色散性，无法准确捕捉到船体远方的波形，与图9~10表现出来的现象基本一致。

本文通过仿真与验证说明，基于ICP实现了国产船舶水动力学数值软件对大规模高性能测试工作提供了平台和算力支撑，如表3所示。

表3 NaViiX软件在ICP运行计算资源和时间
Table 3 NaViiX software runs on ICP to calculate resources and time

| 运行平台 | 并行 节点数 | 并行 核心数 | 运行时间/s |
|--|-----------|-----------|--------|
| CPU 2×7285 OS: NFS Server release 3.2 | 8 | 250 | 28 800 |

4 结论

本文基于Web工业云平台和国产船舶水动力学数值软件并行求解器，完成了对KCS船航行兴波及舷侧波形模拟计算，从结果分析可以看出，国产船舶水动力学数值软件求解器在模拟船体附近波形基本准确，但沿着船体向后，随着网格数量逐渐变稀疏，网格质量变差，表现出一定的耗散性。同时，国产船舶水动力学数值软件基于ICP实现编译和移植过程，把国产软硬件进行了有机融合，基于ICP系统，该软件计算效率线性增长，一般情况下，核数越多，国产船舶水动力学数值软件耗时越短；ICP调用海量计算节点和大内存节点，具备足够的内存，能够实现计算网格量量级化的增长，提高了国产船舶水动力学数

值软件对更精细化流场的捕捉能力。总之，使用国产船舶水动力学数值软件并行求解器，在船体附近可以保证网格数量满足一定要求，能够较好地模拟实际船型的航行兴波问题，为解决实际工程问题中的船舶航行兴波问题提供了有力的国产工程仿真工具。

参考文献:

- [1] 顾蓓蓓. 高性能计算应用驱动发展研究分析[J]. 科研信息化技术与应用, 2019, 10(4): 63-70.
Gu Beibei. Research and Analysis on Application-Driven Development of High-performance Computing[J]. E-Science Technology & Application, 2019, 10(4): 63-70.
- [2] 厉军. 高性能计算应用概览[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018: 286-305.
Li Jun. Overview of High-performance Computing Applications[M]. Beijing: University Press, 2018: 286-305.
- [3] 莫则尧. 高性能数值模拟编程框架研究进展[J]. 科研信息化技术与应用, 2015, 6(4): 11-19.
Mo Zeyao. Progress on High Performance Programming Frame Work for Numerical Simulation[J]. E-Science Technology & Application, 2015, 6(4): 11-19.
- [4] 李国杰. 序言: 发展高性能计算需要思考的几个战略性问题[J]. 中国科学院院刊, 2019(6): 605-608.
Li Guojie. Prologue: Several Strategic Issues to be Considered in Developing High Performance Computing [J]. Chinese Academy of Sciences, 2019(6): 605-608.
- [5] Lu Y T, Qian D P, Fu H H, et al. Will Supercomputers be Super-Data and Super-AI Machines?[J]. Communications of the ACM(S0001-0782), 2018, 61(11): 82-87.
- [6] 钱德沛. 构建支撑科技创新的新一代计算基础设施[J]. 数据与计算发展前沿, 2021, 2(1): 1-17.
Qian Depei. Building a New Generation of Computing Infrastructure to Support Technological Innovation[J]. The Frontier of Data and Computing, 2021, 2(1): 1-17.
- [7] 戴霖. 基于应用的高性能计算平台作业调度算法研究[J]. 电声技术, 2019, 43(5): 52-53.
Dai Lin. Research on Application-based Job Scheduling Algorithm for High Performance Computing Platform[J]. Audio Engineering, 2019, 43(5): 52-53.
- [8] 梁川, 赵峰. 低傅氏数兴波数值预报的不稳定现象及其解决方案[J]. 船舶力学, 2021, 25(4): 399-405.
Liang Chuan, Zhao Feng. Instability Phenomenon and its Solution in Numerical Prediction of Low Fourier Number Wave-making [J]. Ship Mechanics, 2021, 25(4): 399-405.
- [9] 迟学斌. 国家高性能计算环境发展报告(2002-2017年)[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 1-12.

- Chi Xuebin. National High-Performance Computing Environment Development Report (2002-2017) [M]. Beijing: Science Press, 2018: 1-12.
- [10] 李国杰. 序言: 发展高性能计算需要思考的几个战略性问题[J]. 中国科学院院刊, 2019(6): 605-608.
- Li Guojie. Preface: Several Strategic Issues to Considerin Developing High Performance Computing [J]. Journal of Chinese Academy of Sciences, 2019(6): 605-608.
- [11] 吴乘胜, 王星, 王建春, 等. 支持笛卡尔混合格格的不可压流动CFD求解器开发与验证[J]. 中国造船, 2021, 62(3): 127-138.
- Wu Chengsheng, Wang Xing, Wang Jianchun, et al. Development and Validation of Incompressible Flow CFD Solvers Supporting Cartesian Hybrid Grids [J]. China Shipbuilding, 2021, 62(3): 127-138.
- [12] 凌敏, 王骥. 基于Netty和MongoDB的车联网Web系统[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(10): 55-28, 62.
- Ling Min, Wang Ji. Netty and MongoDB Based Internetof Vehicles Web System [J]. Mapping and Spatial Geographic Information, 2021, 44(10): 55-28, 62.
- [13] 彭蔓蔓, 徐立超, 王颖. 异构多核处理器的任务分配及能耗的研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1729-1731.
- Peng Manman, Xu Lichao, Wang Ying. Research on Task Allocation and Energy Consumption of Heterogeneous Multi-Core Processors [J]. Computer Application Research, 2010, 27(5): 1729-1731.
- [14] 周磊, 解茂昭, 贾明. 不同亚网格尺度应力模型在燃油喷雾大涡模拟中的应用[J]. 内燃机学报, 2011, 29(1): 29-35.
- Zhou Lei, Xie Maozhao, Jia Ming. Application of Different Subgrid Scale Stress Models in Large Eddy Simulation of Fuel Spray [J]. Journal of Internal Combustion Engine, 2011, 29(1): 29-35.
- [15] 王建华, 万德成. 高航速KCS船艏破波数值模拟和实验研究[C]//第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集(上册). 上海: 水动力学研究与进展, 2019: 540-545. DOI:10.26914/c.cnkihy.2019.013217.
- Wang Jianhua, Wan Decheng. Numerical Simulation and Experimental Study on Bow Breaking Wave of High Speed KCS Ship [C]//30th National Symposium on Hydrodynamics and the 15th National Symposium on Hydrodynamics. Shanghai: Research and Development of Hydrodynamics, 2019: 540-545. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.013217.
- [16] 耿文静, 董红斌, 丁蕊. 基于MPI的并行多目标粒子群算法[J]. 模式识别与人工智能, 2018, 31(7): 668-676.
- Geng Wenjing, Dong Hongbin, Ding Rui. MPI-based Parallel Multiobjective Particle Swarm Optimization Algorithm[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2018, 31(7): 668-676.
- [17] Kim W J, Van S H, Kim D H. Measurement of Flows Around Modern Commercial Ship Models[J]. Experiments in Fluids(S0723-4864), 2001, 31(5): 567-578.