

团 体 标 准

T/CSNAME 253—2026

船舶航行操纵半物理仿真技术要求

Technical requirements for semi-physical simulation of ship navigation and maneuvering

2026 - 10 - 10 发布

2027 - 01 - 10 实施

中国造船工程学会 发 布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国造船工程学会船舶标准化专业委员会提出。

本文件由中国造船工程学会归口。

本文件起草单位：中国船舶科学研究中心、深海技术科学太湖实验室、国防科技大学试验训练基地。

本文件主要起草人：卜淑霞、储纪龙、孔帅、曾柯、张培杰、杨晨、程成、包磊、雷建奇、高显忠、石彦文、程华荣、辜坚、郑志萍。



船舶航行操纵半物理仿真技术要求

1 范围

本文件规定了船舶航行操纵半物理仿真（以下简称半物理仿真）的系统架构、技术要求、仿真实施流程、仿真验证。

本文件适用于常规海况、高海况及冰区中的船舶航行操纵半物理仿真。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

ISO/IEC/IEEE 42020:2019 软件、系统和企业架构过程（Software, systems and enterprise—Architecture processes）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

半物理仿真 semi-physical simulation

将操控系统实物接入仿真回路，实现人在环路操纵的仿真。

3.2

模型 model

实体或实体集合的抽象描述。能在一定的条件或情况下描绘、理解和预测实体或集合的属性和特征。

3.3

视景 visual scene

可视化的虚拟船舶航行操纵场景。

3.4

高海况 high sea states

有义波高为4 m及以上的海况。

3.5

冰区 ice region

部分或全部海面存在明显海冰分布的海域。

4 仿真系统要求

4.1 架构

针对不同作业场景的半物理仿真，其通用系统架构及硬件见图1。

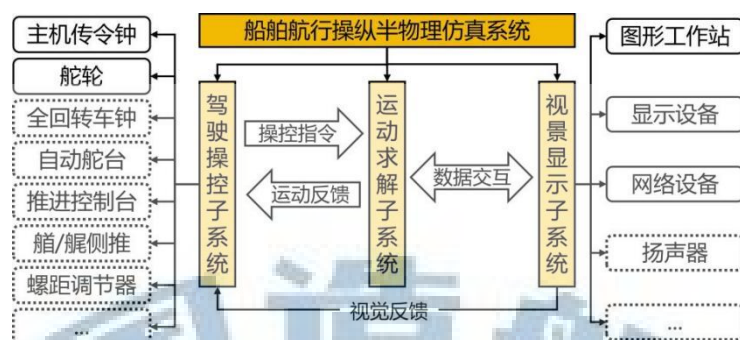


图1 船舶航行操纵半物理仿真系统架构

4.2 驾驶操控子系统

驾驶操控子系统应符合下列要求：

- 操作指令：系统应实时、完整记录操作人员所有操作指令的时间戳与参数；
- 硬件配置：应包括船舶驾控台、航海座椅等操控与承载设施；其中驾控台必备主机传令钟、舵轮；按船型选配全回转车钟、艏/艉侧推车钟等驾驶操控机构及相关显示仪表、组件；
- 数据交互：能将桨、舵操控硬件等机械装置接收的操控指令转换为数字信号，传递给运动求解子系统；应接收运动求解子系统的船舶运动响应计算结果，用于仪表指示及状态显示；若配置多自由度运动平台，应由运动平台根据该结果实现摇荡运动反馈。

4.3 运动求解子系统

运动求解子系统应符合下列要求：

- 求解频率：运动响应求解频率应不小于 20 Hz；
- 载荷精度：船体水动力、桨舵控制力及特殊场景载荷（波浪力、海冰力）的计算结果，应能通过模型试验、CFD 或高可信度数值基准验证，关键分量误差应满足 5.1、5.2 相关要求；
- 响应真实性：在任意操纵控制、航行状态及海况作用下，运动解算结果连续、无跳变；
- 响应精度：支持典型船舶回转运动仿真。在满舵（典型值 35° ，或取目标船最大设计舵角）及全波浪环境下，回转直径和横摇幅值的半物理仿真结果相对试验基准的误差，全类船型以 20% 为不可突破上限；具体地，中型/液散船均小于 18%，高速瘦长型船均小于 15%，客运类船回转直径小于 18%、横摇幅值小于 15%，肥大型船均小于 20%，破冰船（含冰工况）均小于 15%；
- 数据交互：应实时接收驾驶操控子系统的桨舵指令，向视景显示子系统输出船舶位姿与运动状态；各子系统间应保持时钟同步，数据交互时延应满足实时性要求。

4.4 视景显示子系统

视景显示子系统应符合下列要求：

- 硬件配置：应包括图形工作站、显示设备、数据交互的网络设备等；
- 渲染时间：视景渲染平均时间低于 50 ms；
- 背景环境：应涵盖天空、海水、天气等要素，且各要素细节丰富；视船舶航行海域，视景中可具备岛礁、港口等岸基要素；
- 海域环境：应包含目标海域的波浪、风等环境数据；
- 环境声效：由船舶动力声、波浪砰击声等声源混合形成层次结构，冰区工况还应包含海冰撞击声，根据航行环境与船体运动特征共同决定声效混合因子，进而控制各层次声音的混合比例；
- 船体建模：应包含目标船各类三维造型资料（如型线图、总布置图、多角度实船影像等）和 1:1 三维造型建模（包括船体外形、上层建筑、甲板机械等要素）；应保持船体各位置图案、颜色、材质等外观特征在视觉上与实船相近；

- g) 建模格式：可采用*.step、*.igs (*.iges)、*.FBX 等格式生成目标船几何模型，将其与船体坐标系设置、可动部件（螺旋桨、船舵、减摇鳍、补给装置等）局部坐标系设置等，一并导入半物理仿真系统；
- h) 船体运动：支持基于相对运动原理展现船舶实时运动状态，如配备了多自由度运动平台，视景变动过程应扣除平台摇荡位移；支持显示船舶航行轨迹，以及实时航速、航向；在波浪环境中还应保持船波运动相位基本匹配，不出现船体架空等非物理现象；视景中的目标船在波浪环境中应体现六自由度运动，在无波及冰区环境中应体现水平面三自由度运动；
- i) 数据交互：应接收运动求解子系统输出的船舶位姿与运动状态；各子系统间应保持时钟同步，数据交互时延应满足实时性要求。

5 特殊场景要求

5.1 高海况中船舶航行操纵

在高海况中船舶航行操纵下，还应符合下列要求：

- a) 驾驶操控子系统符合第 4.2 节要求。
- b) 运动求解子系统应符合以下要求：
 - 应考虑高海况中船舶所受波浪力的非线性特性，包括瞬时湿表面上的非线性 Froude-Krylov (F-K) 力和静水回复力、波浪绕射力与辐射力、二阶波浪漂移力与漂移力矩，以及波浪粒子速度导致的水动升力等，且相对于高可信度数值基准或试验结果的误差小于 10%；
 - 应考虑高海况中船舶大幅运动时舵、桨实时出入水导致的舵力和推力损失，且满足舵、桨的瞬时浸没深度（或浸没面积）误差小于 15%；舵法向力系数（按全舵面积无量纲化）与螺旋桨推力系数，相对于试验或数值基准的相对误差在浸没比大于 50% 的准稳态区间内小于 10%，在不大于 50% 的近完全出水区间，偏差不超过全浸没状态力的 10%；
 - 可考虑船行波、尾迹、上浪等典型流动特征影响，相关流动特征可通过模型试验、CFD 仿真结果进行提取；
 - 在任意操纵控制、航行状态及海况作用下，运动解算结果连续、无跳变；
 - 高海况工况下回转直径和横摇幅值应满足第 4.3 节中的要求。
- c) 视景显示子系统应符合以下要求：
 - 支持模拟不同等级海况下的三维波面；
 - 应体现船舶摇荡运动；
 - 波浪环境变化平滑；
 - 船周波浪特性应符合物理规律，可利用模型试验、CFD 仿真结果提取船行波、尾迹、上浪等典型流动特征（扩散角度、持续时间等），并在视景显示中与航速、浸没深度、船波相对运动相位进行实时关联；
 - 全场补充波面纹理特征，基于局部波陡触发白沫等渲染效果，提升波浪环境真实感。

5.2 冰区船舶航行操纵

在高海况中船舶航行操纵下，还应符合下列要求：

- a) 驾驶操控子系统符合第 4.2 节要求。
- b) 运动求解子系统应符合以下要求：
 - 应包含目标海域的海冰环境数据；
 - 支持平整冰、浮/碎冰以及无冰工况；
 - 流体动力计算时应考虑海水作用力、风作用力等；
 - 应考虑由船-冰接触、挤压、碰撞等动态过程产生的海冰作用力；
 - 应考虑轴桨推力、舵力、吊舱作用力、艏/艉侧推力等操控机构控制力；
 - 在任意操纵控制、航行状态及船-冰接触状态下，运动解算结果连续、无跳变；
 - 冰区工况下回转直径和横摇幅值应满足第 4.3 节中的破冰船（含冰工况）均小于 15% 要求。
- c) 视景显示子系统应符合以下要求：

- 支持模拟不同厚度、冰型、尺度分布的冰场；
- 应体现船舶水平面运动；
- 应按目标作业海域的冰情，呈现平整冰、浮/碎冰、冰脊、冰山、冰丘等海冰元素；
- 能对海冰断裂、翻转、滑移、压溃等船-冰作用特征进行视觉呈现。

6 仿真实施流程

6.1 数据输入

开始目标船半物理仿真作业前，应选择目标仿真船型，建立船舶相关参数的数据库，各类型参数可通过如下途径获取或进行自定义设置：

- a) 操控要素如下：
 - 操控机构特征参数：通过三维线型文件、几何外形文件等获取桨、舵、吊舱外形特征参数；
 - 操控指令：通过操控硬件的指令状态实时获取操控指令（如主机转速、舵角等）；
- b) 船舶要素如下：
 - 船体基本参数：船长、船宽、吃水、排水状态、惯性半径、惯性矩、重心位置、初稳性高、静水湿表面积、方形系数、中横剖面系数等；
 - 螺旋桨基本参数：螺旋桨个数、桨直径、盘面积、桨叶数、螺旋桨位置等；
 - 舵基本参数：舵个数、舵面积、展弦比、舵位置、最大舵角、舵速等；
 - 船体剖面型值数据：船体横剖面个数、各横剖面型值点个数及坐标；
 - 航行状态参数：仿真作业前按自定义设定，作业中由运动求解子系统实时解算得到；
 - 船舶水动力参数：船体水动力导数、静水阻力、横摇阻尼、推力减额、螺旋桨伴流分数、推力曲线系数、桨舵伴流分数、桨舵相互作用系数等；
 - 二阶波浪力数据：不同遭遇角、傅汝德数、波频条件下的二阶波浪力。遭遇角范围 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ （间隔 5° ， $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 由船体对称性外推）、傅汝德数范围 $0 \sim 0.4$ （间隔 0.05 ）、波频范围 $0.1 \text{ rad/s} \sim 2.5 \text{ rad/s}$ （间隔 0.1 ）。以上为推荐取值，也可根据仿真对象做适配调整。
- c) 环境要素如下：
 - 流体及流动特性：流体物理力学性质（如密度、粘度等）相关参数直接取为常用数值或自定义设定；流动特性相关参数（如风速、海况、浪向等）可自定义设定，并支持在仿真作业中自定义调整；
 - 波浪参数：利用浮标、雷达、视觉等监测手段进行采集，并提取有义波高、平均周期、浪向等波浪参数；
 - 海冰特性参数：通过目标海域海冰冰样的现场、实验室测量获得海冰物理力学性质（密度、强度、弹性模量等）相关参数，或直接取为相关参数的目标海域已有统计值；通过分析目标海域冰场实拍影像获得海冰分布特征（冰型、密集度等）相关参数；海冰特性参数应在仿真作业前设定；支持海冰物理力学性质及冰场分布特征的自定义设定。

6.2 仿真实施

船舶航行操纵半物理仿真的实施流程参考图2。船舶航行操纵半物理仿真按下列步骤进行：

- a) 启动仿真平台：为半物理仿真相关硬件设备（计算机、LED 屏幕等）上电、启动半物理仿真模拟器，启动导调控制终端、进入导调控制界面；
- b) 创建仿真任务：通过任务管理功能新建一个仿真任务，进入任务设置界面；
- c) 选择作业海域：设定当前仿真任务的目标海域，读取作业海域环境数据；
- d) 选择作业船舶：设定当前仿真任务的目标船舶，导入提前建立的目标船舶虚实数据库；
- e) 设置初始状态：设定当前仿真任务下，目标船舶的初始状态，如初始经纬度、航向、航速等；
- f) 下发仿真任务：确定仿真任务设置，包括作业海域波浪/冰场条件，打开并加载仿真任务，开始仿真进程；
- g) 进入仿真场景：加载目标海域环境的仿真场景并由视景系统进行呈现，同时在视景中呈现天空和海洋背景场景和船舶要素，运动求解子系统同步开始运行；

- h) 桨舵操控介入：操控人员通过车钟、舵轮等操控硬件实时介入仿真进程，根据其操控意愿改变驾驶操控指令；
- i) 船体载荷计算：调用船体水动力计算模块、船舶桨舵控制计算模块和特殊场景载荷计算模块，计算当前桨舵操控指令及船周波浪条件下的船体总载荷；
- j) 运动响应求解：运动求解子系统以桨舵操控指令、视景系统船周波浪/冰场条件及目标船舶当前运动状态为输入，对船舶运动响应进行求解计算；
- k) 更新船舶位姿：根据船舶运动响应求解结果，在运动求解子系统中更新船舶位置和姿态；
- l) 视景显示更新：视景系统根据船舶运动响应求解结果更新显示目标船舶的位置和姿态，同时对船体位置、姿态更新导致的船周波浪场、天空景色变化等进行视景刻画与呈现；
- m) 仿真进程判定：根据操控人员意愿，决定是否继续仿真进程，若继续，则仿真模拟各子系统持续运行、对目标船在操纵控制下的航行过程进行求解计算与视景呈现，若需终止仿真进程，则通过导调控制终端实现；
- n) 仿真任务结束：通过导调控制终端，终止仿真进程、结束当前仿真任务。

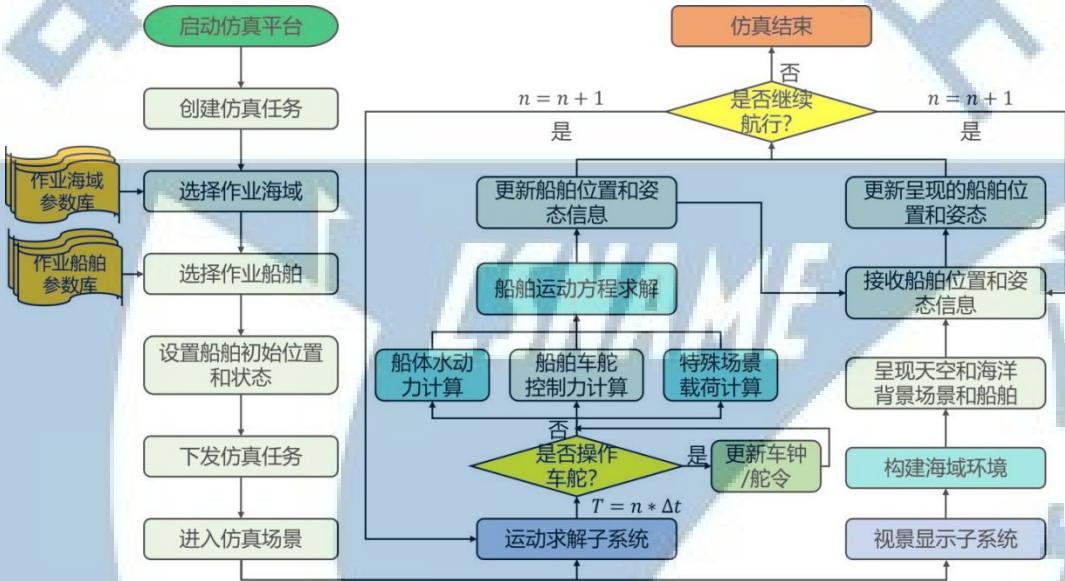


图2 船舶航行操纵半物理仿真实施流程图

6.3 特殊场景仿真实施流程

6.3.1 高海况中船舶航行操纵

在通用仿真实施流程基础上，针对高海况中船舶航行操纵场景进行适配：

- a) 在下发仿真任务步骤，应设定目标海域海况，并在视景显示子系统中加载实时三维波面；
- b) 船体载荷计算步骤，特殊场景载荷计算模块应考虑非线性波浪力及二阶波浪力影响；
- c) 在运动响应求解步骤，应求解操纵-耐波耦合运动方程。

6.3.2 冰区船舶航行操纵

在通用仿真实施流程基础上，针对冰区船舶航行操纵场景进行适配：

- a) 在下发仿真任务步骤，应设置作业海域冰情条件，并在视景显示子系统中加载三维冰区环境；
- b) 在船体载荷计算步骤，特殊场景载荷计算模块应考虑船周冰情条件下的海冰作用力及相关船体载荷；
- c) 在运动响应求解步骤，应求解三自由度（水平面内）或以上自由度的船舶运动方程。

7 仿真实验

7.1 基本要求

依据仿真任务书,对比模型试验和数值模拟数据,从仿真过程真实性和结果输出完备性,对仿真实施各环节进行验证。

针对半物理仿真输出结果的验证,通过在不同作业场景与操控策略下开展船舶回转运动、Z形操纵半物理仿真,系统提取半物理仿真输出的船舶运动状态、受力状态、航态及航迹信息,获取回转直径、稳定航速、超越角、转艏滞后等关键操纵性能评价指标,验证半物理仿真结果的可靠性。

7.2 仿真过程真实性验证

7.2.1 查验标准

半物理仿真作业过程的真实性可根据表1的等级检验参考表,对驾控硬件还原度、船舶行为真实性、仿真场景逼真度三个方面进行查验。

表1 船舶航行操纵半物理仿真查验标准

查验项	小类	等级			
		优	良	中	差
驾控硬件还原度	-	查验项齐全且数量一致,且台面布局、外观与主要标识与实船一致,颜色材质与功能标签视觉上无差异;指令采集分辨率与量程满足要求并完整记录时间戳与参数;仪表指示与声光报警齐备且随运动响应正确反馈,无卡滞跳变。	查验项齐全且数量一致,布局基本合理,外观与主要标识基本一致;指令采集分辨率与量程满足要求并完整记录时间戳与参数,主要仪表指示具备、报警简化,偶有轻微卡滞或响应延迟但不影响操作。	查验项的非关键件缺项或数量不符 ≤ 1 处,且布局明显偏离,标识部分缺失或不清;指令可采集但未记录时间戳;仪表指示与操控不同步,存在明显延迟或卡滞。	查验项的关键件缺失或数量不符 ≥ 2 处,且布局严重偏离致无法按实船习惯操作,标识错误致操作误判;操控机构为纯软件模拟无实体硬件,指令无法采集、无法传递或无记录,仪表与操控完全脱节、持续无响应。
船舶行为真实性	--	能覆盖全部典型操控条件与全部海况条件,冰区船舶还应按目标作业海域覆盖无冰、平整冰、浮/碎冰三类海冰条件;各项相对误差均不超过该船型和海况的限值(参考本标准5技术要求,未按规定限值的指标按仿真任务书约定或参考图3示例记录)。	能覆盖全部典型操控条件与全部海况条件(海冰条件可部分覆盖);各项相对误差均不超过该船型和海况限值(参考本标准5技术要求,未按规定限值的指标按仿真任务书约定或参考图3示例记录),但无充分余量。	仅能覆盖部分典型操控条件或部分海况/冰况条件;或各项相对误差已超出该船型限值但未突破20%全局红线。	关键工况缺失(如缺回转操控条件、缺海冰条件等);或任一指标相对误差超过20%不可突破上限。
仿真场景逼真度	船体三维造型逼真度	查验项齐全且数量一致;局部坐标系正确,主要尺度相对误差 $\leq 2\%$;安装位置误差 $\leq 0.3\%L_{pp}$,细节层次与实船一致;外观颜色、材质视觉上无差异,标识清晰正确;随操纵输入实时动作;运动范围、速率、转向与船舶一致。	查验项齐全且数量一致;主要尺度误差 $\leq 5\%$;位置误差 $\leq 0.8\%L_{pp}$,主结构完整,次要附属件适度简化,不影响识别;外观基本一致,标识可辨识;随船动作正确,速率或极限角度偏差 $\leq 10\%$ 。	查验项缺项或数量不符 ≤ 1 处;主要尺度误差 $\leq 10\%$;位置误差 $\leq 1.5\%L_{pp}$;外观仅保留外形轮廓,结构明显简化,特征可辨但失真;标识部分缺失;随船有动作但逻辑/转向/时序错误,或与操纵输入无联动。	查验项缺项或数量不符 ≥ 2 处;主要尺度误差 $>10\%$;安装位置明显错误;外形失真,无法辨识或误识别为其他部件;颜色/材质明显错误或标识错误;错动、穿模、运动方向相反,或无法驱动。
	航行环境逼真度	查验项齐全且覆盖全部设定工况,特征参数与实测或统计值偏差 $\leq 10\%$ 且严格符合物理规律;形态纹理光照层次与实拍影像视觉上无差异。	查验项齐全但个别类型适度简化;主要参数偏差 $\leq 20\%$ 且主要物理规律符合;层次较丰富、次要细节简化但不影响判读。	查验项缺项或类型单一;参数偏差 $\leq 40\%$ 且物理规律部分失真;细节简单、纹理重复可辨、空间层次弱。	查验项缺项严重或与设定工况不符;参数偏差 $>40\%$ 或违反物理规律(含船体架空等非物理现象);形象明显失真致无法辨识查验项类型。

表1 船舶航行操纵半物理仿真查验标准（续）

查验项	小类	等级			
		优	良	中	差
	船体与环境动态交互作用逼真度	动态交互行为由正确物理事件触发且与运动求解输出同步（偏差≤0.05 s 或≤5%特征周期）；形态与尺度特征相对模型试验/CFD 基准偏差≤10%，时序与持续时间偏差≤10%；层次与细节丰富且与实拍影像视觉上无差异，全过程平滑无跳变、无穿模、无穿帮。	动态交互行为由正确物理事件触发且与运动求解输出同步（偏差≤0.1 s 或≤10% 特征周期）；形态与尺度特征偏差≤20%，时序与持续时间偏差≤20%；主要交互特征具备而关联规则适度简化，层次较丰富、次要细节简化但不影响判读，偶有轻微跳变但不影响观察。	动态交互行为触发与物理事件关联弱或为固定动画/预设贴图（偏差≤0.5 s 或≤20%特征周期）；形态与尺度偏差≤40%；时序或持续时间明显不符，与船体运动关联弱或交互特征缺失，动画重复可辨，存在明显跳变、穿帮或穿透。	动态交互行为无触发逻辑或触发与物理事件明显颠倒错位，形态与尺度偏差>40%或违反物理规律；时序严重错误或特征瞬时生成/消失，与环境及船体运动完全脱节，持续出现穿模、穿插、闪烁等严重伪影。

7.2.2 驾控硬件还原度

主要验证半物理仿真中船舶驾控硬件与实船驾驶室硬件配置间的还原度，具体操作实践中可参考图3的示例进行逐项查验。

7.2.3 船舶行为真实性

主要验证船在人员操纵控制与高海况/海冰载荷作用下的运动响应真实与否、是否能真实反映目标船舶的实船航行操纵性能。通过对比典型操控条件、海况与海冰条件下的运动求解计算结果与实船试航、模型试验、数值模拟结果间的误差进行验证，具体操作实践中可参考图4的示例进行逐项查验。

7.2.4 仿真场景逼真度

主要验证对船舶三维造型、航行环境及船体与环境间动态交互作用过程的视景呈现逼真度，可从仿真场景所涉及视景元素的丰富度及其视觉渲染效果进行评价。具体操作实践中，可参考图5的示例进行逐项查验。

7.3 结果输出完备性验证

进行船舶航行操纵的预报与航行作业仿真分析，通常需与船舶航行操纵过程相关的诸多类型数据，如航速、航向、冰力、操控指令的时历数据以及海冰场分布信息、海冰物理力学性质等。船舶航行操纵半物理仿真作业应输出类型丰富、数量充裕、精度足够的各类仿真结果信息，以供半物理仿真评价、通航作业分析所使用。所需的相关数据可分为仿真环境数据、操纵控制数据、运动响应数据和船舶受力数据四类。

7.3.1 仿真环境数据

主要验证仿真过程中浪、冰等环境要素的时空分布及统计数据是否完整输出。具体操作实践中，仿真环境数据的参数及精度要求示例可参考图6。

7.3.2 操纵控制数据

主要验证操舵、主机、侧推器等操纵指令及反馈数据的输出是否完整。具体操作实践中，操纵控制数据的参数及精度要求示例可参考图7。

7.3.3 运动响应数据

主要验证船舶位置、航速及六自由度运动的输出是否完整。具体操作实践中，运动响应数据的参数及精度要求示例可参考图8。

7.3.4 船舶受力数据

主要验证船体所受水动力、波浪力、冰相关力、操纵控制力等数据的输出是否完整。具体操作实践中，船舶受力数据的参数及精度要求示例可参考图9。

查验项	实船驾驶室		半物理仿真系统		还原度 (优/良/中/差)
	有/无 (√/X)	数量	有/无 (√/X)	数量	
车钟/全回转车钟					
舵轮					
自动舵台					
推进控制台					
艏侧推					
艉侧推					
螺距调节器					
.....					

图3 驾控硬件还原度查验示例

操控条件	海况/海冰条件	初始航态	航速 相对误差 (%)			回转直径 相对误差 (%)			加/减速时间 相对误差 (%)				真实性 (优/良/中/差)
			与 实 船 试 航	与 模 型 试 验	与 数 值 模 拟	与 实 船 试 航	与 模 型 试 验	与 数 值 模 拟	与 实 船 试 航	与 模 型 试 验	与 数 值 模 拟		
进车 零舵角	静水	零航速				--	--	--					
回转 满舵角	静水	设计航速	--	--	--				--	--	--		
直航 零舵角	4级海况波面	服务航速				--	--	--	--	--	--		
回转 满舵角	4级海况波面	服务航速							--	--	--		
直航 零舵角	6级海况波面	服务航速				--	--	--	--	--	--		
回转 满舵角	6级海况波面	服务航速							--	--	--		
.....													
直航 零舵角	无冰 静水	设计航速				--	--	--	--	--	--		
回转 满舵角	无冰 静水	设计航速	--	--	--				--	--	--		
限速进车 零舵角	平整冰 典型冰条件	零航速				--	--	--					
回转 满舵角	平整冰 典型冰条件	冰区安全 航速	--	--	--				--	--	--		
限速进车 零舵角	浮/碎冰 典型冰条件	零航速				--	--	--					
回转 满舵角	浮/碎冰 典型冰条件	冰区安全 航速	--	--	--				--	--	--		
.....													

图4 船舶行为真实性查验示例

船体三维造型逼真度						
查验项	实船		仿真场景		逼真度 (优/良/中/差)	
	有/无（√/X）	数量	有/无（√/X）	数量		
桅杆						
起重机						
救生艇						
直升机甲板						
直升机						
烟囱						
船锚						
锚机						
螺旋桨						
舵						
舷号						
.....						
航行环境逼真度			船体与环境动态交互作用逼真度			
查验项	目标海域 有/无（√/X）	仿真场景 有/无（√/X）	逼真度 (优/良/中/差)	查验项	视景呈现画面 有/无（√/X）	逼真度 (优/良/中/差)
日/月/星				船行波		
雨/雾/风/雪				上浪		
海岸/岛礁				尾迹		
远场域波面				砰击飞溅		
微幅碎波				冰层断裂		
波面破碎白沫				冰块脱落		
平整冰				碎冰翻转		
浮/碎冰				冰沿船滑移		
冰脊				海冰劈裂		
冰山				浮/碎冰推移		
冰丘				浮/碎冰碰撞		
冰面覆雪				浮/碎冰漂移		
.....						

图5 仿真场景逼真度查验示例

环境参数	单位	数据精度要求	环境参数	单位	数据精度要求
波高	m	精度 10%，分辨率 0.1m	浪向角	°	主浪向角误差为正负 10°
波周期	s	误差为正负 0.5s，分辨率 0.1s	冰型	--	--
冰厚度	m	精度 2%；分辨率 0.01m	冰密度	kg/m³	精确到小数点后两位
冰强度	MPa	精度 2%；分辨率 0.01MPa	冰密集度	%	精确到小数点后两位
冰弹性模量	GPa	精度 2%；分辨率 0.01GPa	海冰场分布	--	分辨率 1m*1m
.....					

图6 仿真环境数据要求示例

操控参数	单位	数据精度要求	操控参数	单位	数据精度要求
时间	s	精确到毫秒级	舵角	°	精确到小数点后两位
主机输出功率	kW	精确到小数点后四位	轴桨转速	rpm	精确到小数点后两位
侧推输出功率	kW	精确到小数点后四位	侧推桨转速	rpm	精确到小数点后两位
吊舱输出功率	kW	精确到小数点后四位	吊舱回转角	°	精确到小数点后两位
*****	*****	*****	*****	*****	*****

图7 操纵控制数据要求示例

航速	kn	精确到小数点后两位			
纵向位置	m	精确到毫米级	横向位置	m	精确到毫米级
垂向位置	m	精确到毫米级	横摇角	°	精确到小数点后两位
纵摇角	°	精确到小数点后两位	艏向角	°	精确到小数点后两位
纵荡速度	m/s	精确到小数点后两位	横荡速度	m/s	精确到小数点后两位
垂荡速度	m/s	精确到小数点后两位	横摇角速度	°/s	精确到小数点后两位
纵摇角速度	°/s	精确到小数点后两位	艏摇角速度	°/s	精确到小数点后两位
纵荡加速度	m/s ²	精确到小数点后两位	横荡加速度	m/s ²	精确到小数点后两位
垂荡加速度	m/s ²	精确到小数点后两位	横摇加速度	°/s ²	精确到小数点后两位
纵摇加速度	°/s ²	精确到小数点后两位	艏摇加速度	°/s ²	精确到小数点后两位
*****	*****	*****	*****	*****	*****

图8 运动响应数据要求示例

冰区船舶航行操纵					
受力参数	单位	精度要求	受力参数	单位	精度要求
纵向冰力	kN	精确到小数点后两位	轴桨推力	kN	精确到小数点后两位
横向冰力	kN	精确到小数点后两位	侧推力	kN	精确到小数点后两位
冰力矩	kN·m	精确到小数点后两位	吊舱推力	kN	精确到小数点后两位
纵向舵力	kN	精确到小数点后两位	横向舵力	kN	精确到小数点后两位
舵力矩	kN·m	精确到小数点后两位	*****	*****	*****

图9 船舶受力数据要求示例