

团 体 标 准

T/CSNAME 201—2026

内河自主船舶编队航行仿真及实船 RAMSI 验证与评估规程

Inland waterway autonomous ship convey navigation simulation and actual ship
RAMSI verification and evaluation practice

2026-06 -05 发布

2026-09-05 实施

中国造船工程学会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 1

5 验证评估流程 1

 5.1 验证评估类型 1

 5.2 仿真验证流程 1

 5.3 实船验证流程 3

6 验证程序 4

 6.1 仿真测试验证 4

 6.2 实船实测验证 7

7 评估程序指示 8

 7.1 评估方法 8

 7.2 评估指标 9

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：大连海事大学、中国船级社、武汉理工大学、交通运输部天津水运工程科学研究所、大连市自主航运安全技术重点实验室。

本文件主要起草人：周翔宇、章文俊、杨雪、孟祥坤、孙旭、马勇、马枫、干伟东、周俊伟、王英杰、任晓航、张逸卓、刘安培。



内河自主船舶编队航行仿真及实船 RAMSI 验证与评估规程

1 范围

本文件规定了内河自主船舶编队（以下简称“编队”）航行RAMSI（可靠性、可用性、可维护性、安全性、互操作性）的仿真与实船验证评估的程序确立、程序指示及评估方法。

本文件适用于由一艘领导船与多艘跟随船形式构成的内河自主船舶编队，在其设计、测试验证及运营阶段开展的RAMSI性能验证与评估活动。

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。

GB 50139—2014 内河通航标准

JTS196—6—2012 三峡船闸通航调度技术规程

T/CSNAME 200—2026 内河自主船舶编队航行RAMSI验证与评估指南

3 术语和定义

T/CSNAME 200—2026界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

航行场景 navigation scenario

编队开航后，在无特殊操作（如避碰、过闸）情况下的常规航行过程。

3.2

避碰场景 collision avoidance scenario

编队在航行过程中遇到静态障碍物、动态障碍物或其他船只的场景。

3.3

过闸场景 lockage scenario

编队在航行过程中通过内河船闸的场景。

3.4

领导船 leader ship

在编队航行体系中处于主导地位，承担编队整体航行决策与引导作用的多人或单人值守船舶。

3.5

跟随船 follower ship

在编队航行体系中处于从属地位，依据编队运行要求调整自身航行以保持队形与安全的少人或无人值守船舶。

4 缩略语

5 验证评估流程

5.1 验证评估类型

内河自主船舶编队RAMSI验证评估程序由仿真验证评估和实船验证评估两部分组成：

- 仿真验证评估：采用高负荷循环仿真测试验证方法和基于指标的评估方法开展；
- 实船验证评估：首先采用实测验证方法和基于指标的评估方法，而后采用长周期运营验证评估方法开展。

5.2 仿真验证流程

- 5.2.1 仿真验证评估程序分为验证和评估两个部分，共四个步骤，基本流程如图 1 所示。
- 5.2.2 验证部分采取分场景仿真验证方法，包括编队航行、编队避碰、编队过闸三个主要场景。其中，航行场景与避碰场景为必要性验证场景，过闸场景为辅助性验证场景。高负荷循环仿真验证方法流程如图 2 所示，测试者可通过施加外部应力（如航行环境的干扰、任务的复杂程度等）和注入内部故障（如编队通信的中断、船舶动力的失效等）的方式提高编队的运行负荷。
- 5.2.3 评估部分依托所构建的 RAMSI 仿真评估指标与指标计算方法展开。

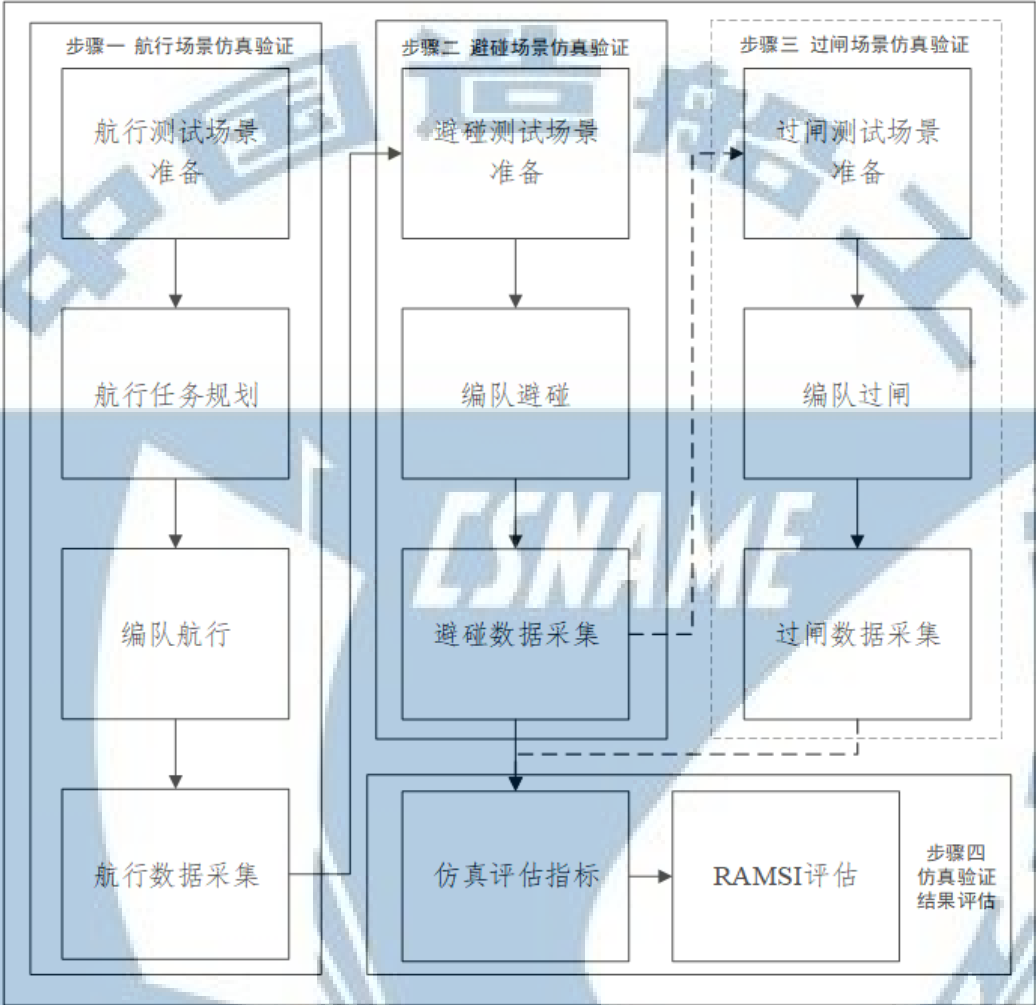


图1 仿真验证评估程序基本流程图

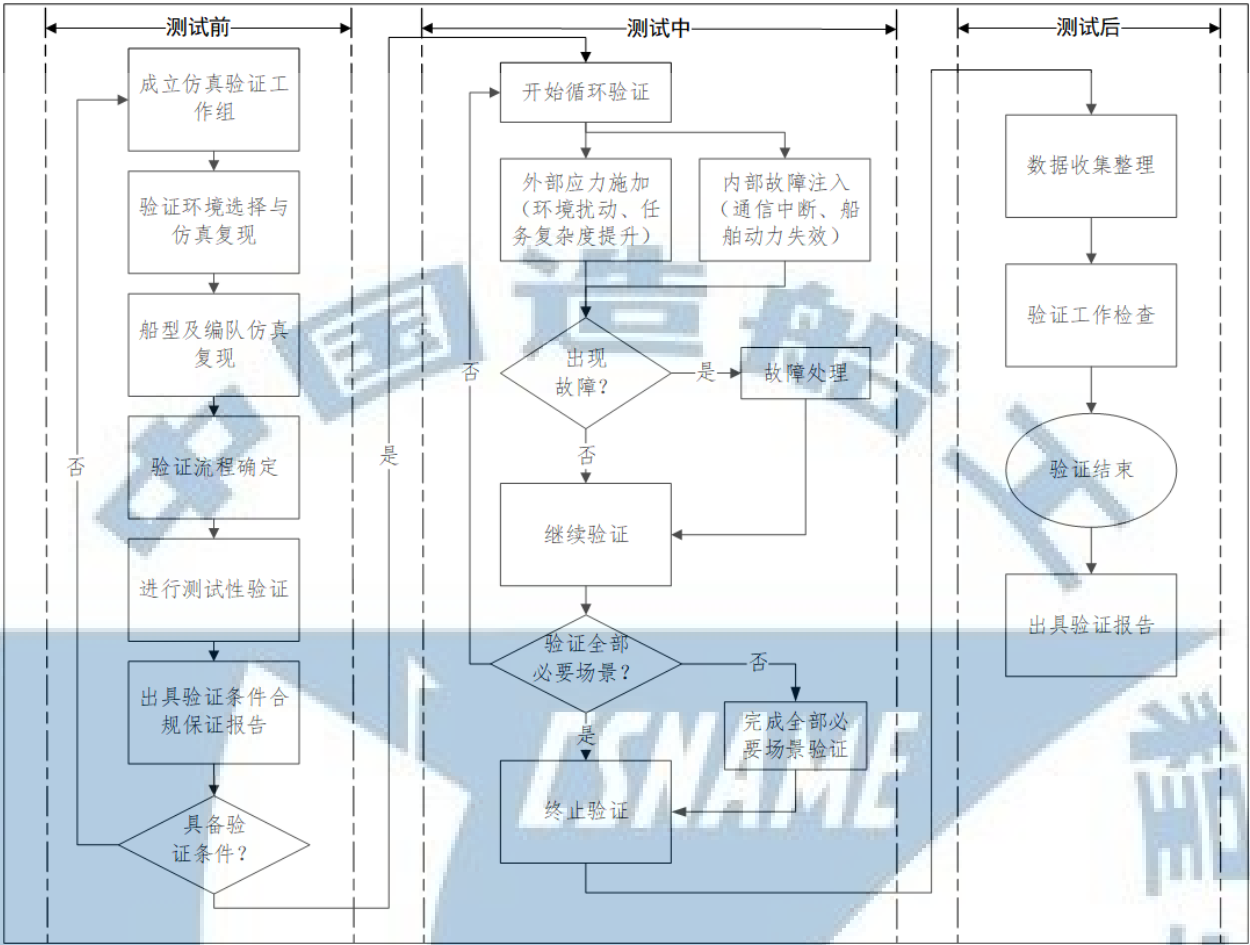


图2 高负荷循环仿真验证方法流程

5.3 实船验证流程

5.3.1 实测验证阶段

- 5.3.1.1 实测验证评估程序分为验证和评估两个部分，共三个阶段。实测验证评估流程如图 3 所示。
- 5.3.1.2 实测验证阶段应采用任务驱动测试方法，通过发布测试性航行任务，使自主船舶编队在执行任务的过程中随机触发多种场景，从而实现其在复杂条件下的 RAMSI 实船验证。
- 5.3.1.3 评估部分依托所构建的 RAMSI 实测评估指标与指标计算方法展开。

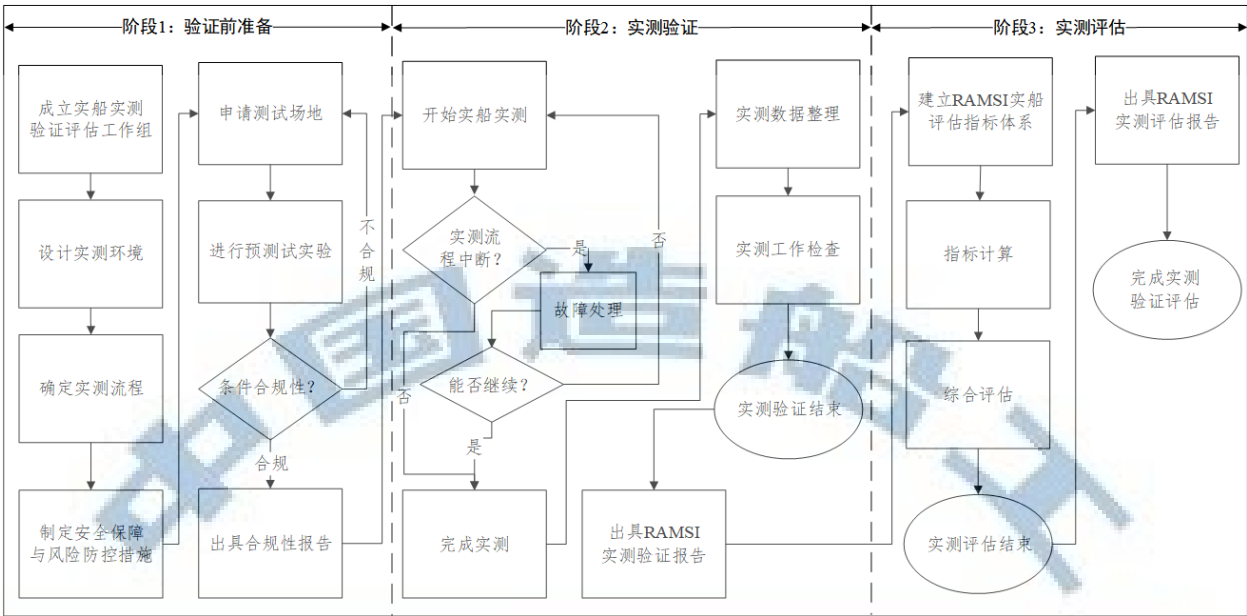


图3 实测验证评估程序流程图

5.3.2 长周期运营阶段

在自主船舶编队投入营运后，使用方应每年向相关利益方提供使用信息，包括故障、维修记录数据等，由相关利益方进行RAMSI评价，具体数据如：

- a) 自主船舶编队系统的运行监测数据及报警、故障、维修记录，一般包括发生故障的日期和时间，故障现象，故障原因，故障产品列号或版本号，涉及的设备、软件或系统，故障时刻的工作条件和环境条件等基本描述，以及维修或恢复时间后续每次故障的发生时间及其维修或恢复时间；
- b) 自主船舶编队系统的故障现象，包括局部或全部整体失效的原始症状、超出规定范围的参数值等；
- c) 对于系统内部的可维修产品，提供故障后的维修或恢复时间；对于不可维修产品，如机械及电子配件等，应提供产品更换时间信息、次数、频率等相关数据信息。

6 验证程序

6.1 仿真测试验证

6.1.1 航行场景仿真 RAMSI 验证

6.1.1.1 测试环境仿真

测试环境仿真应满足下列要求：

- a) 选定测试水域，记录其不少于 30 天的气象、海况、水文等环境数据；
- b) 在仿真系统中模拟测试水域航行环境，应复现风浪流、航道水深和宽度等关键参数。

6.1.1.2 受测船型仿真

受测船型仿真应满足下列要求：

- a) 船型应根据 GB 50139—2014 第 3 章的规定选择，确保吨位、吃水等符合内河航行的安全要求；
- b) 在仿真系统中构建受测船舶数学模型，应复现其运动学和动力学特征。

6.1.1.3 编队队形仿真

编队队形仿真应满足下列要求：

- a) 根据航行任务需求和实际运行水域确定编队队形并在仿真系统中复现；

- b) 队形配置应区分领导船和跟随船，领导船负责路径规划和决策，跟随船负责保持队形和同步航行；
- c) 编队船舶之间的初始间距应根据船舶长度、航速和水域条件选定，确保航行安全。

6.1.1.4 编队通信仿真

编队通信仿真应满足下列要求：

- a) 应在仿真系统中复现领导船与跟随船、跟随船与跟随船之间的通信行为；
- b) 应在仿真系统中体现自主船舶编队与岸基控制中心之间的通信行为。

6.1.1.5 航行规划仿真

航行规划仿真应满足下列要求：

- a) 结合测试水域的实际情况和内河通航规则进行路径规划，明确航线的详细信息，包括里程、起始点、航路点、不同航段的航向、转向点等，确保航线清晰可执行；
- b) 规定期望航速，应以经济航速为编队的期望航速；
- c) 设置安全裕度，考虑船舶吃水与航道水深匹配度，设置适当的安全裕度；
- d) 配置船舶积载，结合自主船舶编队的任务性质、应用场景，合理配置货物积载。仿真测试中，可将船舶积载转化为船舶排水量叠加。

6.1.1.6 航行过程仿真

航行过程仿真应满足下列要求：

- a) 仿真系统中的自主船舶编队按预定的计划执行航行任务；
- b) 应在仿真系统中复现岸基控制中心对自主船舶编队的可能的操控过程。

6.1.1.7 仿真航行数据采集

仿真航行数据采集应包含但不限于下列内容：

- a) 队内各船实时位置，并融合成实际运行轨迹；
- b) 队内各船实时航速和航向信息；
- c) 编队船间通信的实时带宽、延迟等通信状态数据；
- d) 仿真测试用时。

6.1.1.8 测试结束

确认上述项目完成后，可以结束本场景仿真测试，并开始自主船舶编队避碰场景仿真 RAMSI 验证。

6.1.2 避碰场景仿真 RAMSI 验证

6.1.2.1 测试环境仿真

测试环境仿真应满足下列要求：

- a) 测试包含静态障碍物避碰和动态障碍物避碰水域，记录其不少于 30 天的气象、海况、水文等环境数据；
- b) 在仿真系统中模拟测试水域航行环境，应复现障碍物、风浪流、航道水深和宽度等关键参数（应在仿真系统中复现动态障碍物特征，如尺寸、运动方向、速度等）。

6.1.2.2 受测船型仿真

按照 6.1.1.2 要求。

6.1.2.3 编队队形仿真

按照 6.1.1.3 要求。

6.1.2.4 编队通信仿真

按照 6.1.1.4 要求。

6.1.2.5 避碰过程仿真

碰撞过程仿真应满足下列要求：

- a) 编队在搭建好的测试场景中，按照《中华人民共和国内河避碰规则》，根据航行态势自行完成避碰；
- b) 编队避碰行为应在直航过程中触发；
- c) 完成避碰后，编队应尽快恢复队形，继续航行至终点结束测试；
- d) 避碰过程中应体现队内船舶信息交互的过程；
- e) 应在仿真系统中复现岸基控制中心对自主船舶编队的可能的操控过程。

6.1.2.6 仿真数据采集

仿真数据采集应包含但不限于下列内容：

- a) 队内各船实时位置，并融合成实际避碰轨迹；
- b) 队内各船实时航速和航向信息；
- c) 队内各船与障碍物之间的实时距离；
- d) 静态障碍物的位置、动态障碍物的运动轨迹数据；
- e) 编队船间通信的实时带宽、延迟等通信状态数据；
- f) 仿真测试用时。

6.1.2.7 测试结束

确认上述项目完成后，可以结束本场景仿真测试，并开始自主船舶编队过闸场景仿真 RAMSI 验证。

6.1.3 过闸场景仿真 RAMSI 验证

6.1.3.1 测试环境仿真

测试环境仿真应满足下列要求：

- a) 记录测试船闸水域不少于 30 天的气象、海况和水文数据，船闸水域必须包括引航道、闸室、闸门等关键区域；
- b) 在仿真系统中模拟测试水域航行环境，应复现闸室空间尺度、停止线位置、系泊位置、风浪流、航道水深和宽度等关键参数。

6.1.3.2 受测船型仿真

按照 6.1.1.2 要求。

6.1.3.3 编队队形仿真

编队队形仿真应满足下列要求：

- a) 根据航行任务需求和实际运行水域确定编队队形并在仿真系统中复现；
- b) 队形配置应区分领导船和跟随船，领导船负责路径规划和决策，跟随船负责保持队形和同步航行；
- c) 编队船舶之间的初始间距应根据船舶长度、航速和水域条件选定，确保航行安全；
- d) 应参考 JTS196—6—2012 第 3 章的规定设置编队过闸期望航速。

6.1.3.4 编队通信仿真

按照 6.1.1.4 要求。

6.1.3.5 过闸过程仿真

过闸过程仿真应满足下列要求：

- a) 编队在搭建好的测试场景中，按内河标准过闸流程，完成引航道航行、闸室内移泊、系泊排水、驶离闸室四个阶段的测试；
- b) 编队过闸行为应在直航过程中触发；
- c) 完成过闸后，编队应尽快恢复队形，继续航行至终点结束测试；

- d) 过闸过程中应体现队内船舶信息交互的过程；
- e) 应在仿真系统中复现岸基控制中心对自主船舶编队的可能的操控过程。

6.1.3.6 仿真数据采集

仿真数据采集应包含但不限于下列内容：

- a) 记录队内各船实时位置，并融合成实际运行轨迹；
- b) 记录队内各船实时航速和航向信息；
- c) 采集进入闸室后，队内各船间距、各船距闸室壁距离、停止后各船距停止线距离；
- d) 记录编队船间通信的实时带宽、延迟等通信状态数据；
- e) 记录仿真测试用时。

6.1.3.7 测试结束

上述项目完成后，应结束场景仿真测试，并基于仿真验证数据开始自主船舶编队 RAMSI 评估。

6.2 实船实测验证

6.2.1 搭建实测试验平台

搭建实测试验平台按以下步骤依次进行：

- a) 设计实测环境：选择或构建涵盖开阔水域、狭窄水域和高交通流密度水域特征的内河航行环境，确保能覆盖完整工作周期及复杂工况的验证需求；
- b) 设计任务流程：根据实际验证需求，设计自主船舶编队的航行任务流程。任务场景宜包括内河航行中的典型场景，如巡航、避障、过弯等；
- c) 配置编队船型：选用符合 GB 50139—2014 第 3 章的规定的船型，确保其吨位、吃水等参数满足内河航行安全要求；
- d) 配置编队队形：根据船舶长度、航速和水域条件，确定编队船舶间的初始间距，以确保航行安全。明确领导船与跟随船的角色，领导船负责路径规划和决策，跟随船负责保持队形和同步航行，所有船舶共同负责态势感知；
- e) 配置船舶积载：根据自主船舶编队的任务性质与应用场景，合理配置货物积载；
- f) 配置技术团队：为每艘船舶装备数据采集设备，并配备以下人员：至少一名船舶应急操作人员、至少一名数据采集人员、至少一名急救医护人员；
- g) 设计应急预案：针对可能发生的突发事件设计应急预案。预案内容应包括但不限于下列内容：
 - 1) 配备专用拖轮以应对船舶失控、搁浅或碰撞事故；
 - 2) 合理部署船载及岸基消防系统与隔离装置以应对火灾事故。
- h) 完成预案设计后，组织技术团队进行演练；
- i) 出具验证平台报告：完成上述步骤后，编写验证平台搭建报告。将报告提交专家组评审，评审通过后，方可开始预测试验证。

6.2.2 预测试验证

预测试验证应按照下列步骤开展：

- a) 申请测试场地：根据验证需求向管理部门提交场地使用申请；
- b) 制定预测试任务：预测试的主要目的是适应测试水域和进行设备校准调试。测试任务应面向编队态势感知系统、通信系统和决策系统等，以静态任务为主；
- c) 执行预测试：根据预测试任务规划执行预测试，过程中应记录预测试数据；
- d) 设备校准与调试：根据预测试结果反馈进行相关设备的调试与校准；
- e) 合规性审查：工作组应根据编队的预测试结果完成对编队设备、测试水域的合规性审查，确保各项内容满足实测试验证需求；
- f) 出具预测试报告：完成上述任务后，工作组应出具预测试报告以总结预测试报告情况，经专家组评审通过后可以开始实测试验证。

6.2.3 实测试验证

实试验验证流程应按照下列顺序开展：

- a) 确认任务流程：根据验证平台报告中提出的任务流程，结合实际测试水域环境进行完善和修改，形成可供编队执行的测试任务流程。该流程应覆盖内河航行过程中的典型运行场景，同时应满足针对编队感知功能、决策功能、控制功能、通信功能的测试；
- b) 感知功能测试：编队感知功能的测试分为自然环境感知测试和交通环境感知测试。自然环境感知主要面向航道自然环境（如风、浪、流、航道尺度等）进行识别；交通环境感知主要面向航道标志、航标、桥梁净空高等交通基础设施和编队外的其他船舶以及动态障碍物进行识别；
- c) 决策功能测试：编队决策功能测试主要用于验证编队在复杂内河航道中的路径规划能力。测试场景应选用内河典型运行场景，在任务起点至终点间设置多类型障碍物与风险区域（如岛屿、礁石区、禁航区等不可航行区域或锚泊区，分道通航制区域、狭窄水道等谨慎航行区域），编队应在起点至终点之间规划一条遵守航行规则且无航行风险的全局路径，并根据实时航行情况进行局部路径调整；
- d) 控制功能测试：编队控制功能测试主要用于验证编队在内河航道中按照既定航线保持稳定的能力，同时队内各船应根据自身相对位置完成本船速度、间距、姿态的调整，从而保障编队队形稳定；
- e) 通信功能测试：编队通信功能测试主要用于验证编队在内河航道中信息交互的可靠性和实时性；
- f) 数据采集与整理：数据采集应与上述功能测试同步进行，在完成上述功能测试后应及时进行数据整理，包括数据清洗、标注、分类与打包、备份等；
- g) 验证工作检查：完成上述工作后，工作组应出具实试验验证报告以总结实试验验证情况，经专家组评审通过后方可开展后续评估工作。

7 评估程序指示

7.1 评估方法

通过主观赋权、客观修正和证据融合三个步骤进行综合评估，具体流程如图 4 所示：

- a) 通过专家经验对各评价指标进行重要性判断，建立判断矩阵，并进行一致性检验，从而获得同一层级指标的初始权重。常用的主观赋权方法包括层次分析法、专家调查法（德尔菲法）、模糊分析法、二项系数法、环比评分法、最小平方法、序关系分析法等；
- b) 为增强权重的客观性，引入各指标数据的离散程度信息，并采用权重修正系数（变异系数）对修正初始权重。常用的权重修正系数计算方法包括变异系数法、最大熵计数法、主成分分析法、多目标规划法、均方差法、最大离差法、简单关联函数法等；
- c) 对离散的多指标信息进行融合，在通过置信度检验基础上输出最终的综合评价结果，完成对内河自主船舶编队航行仿真及实船 RAMSI 的评估。常用的信息融合方法包括 D-S 证据理论、多准则决策方法等。

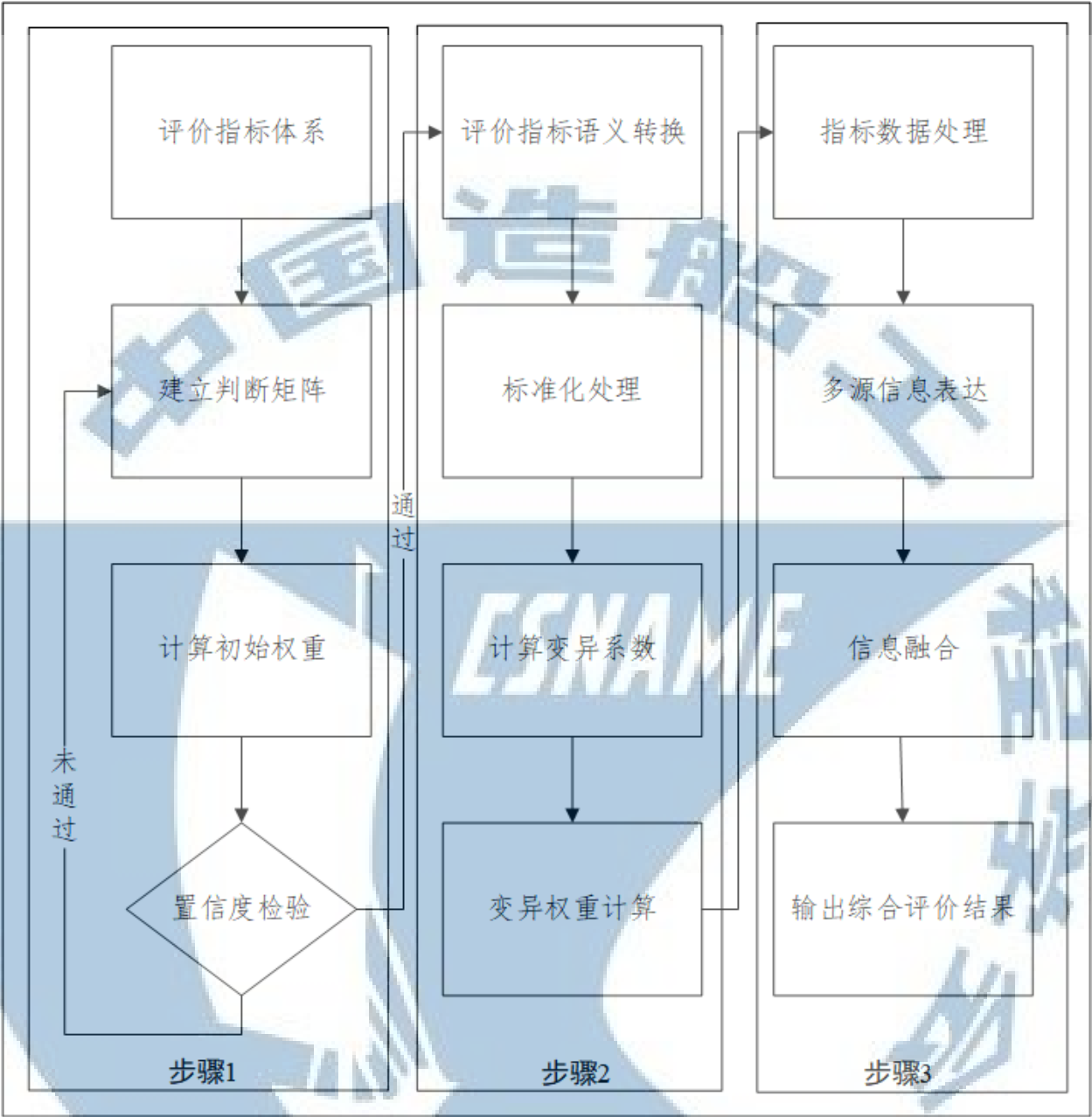


图4 评估程序

7.2 仿真结果评估指标

7.2.1 航行决策可靠性

7.2.1.1 航道适应能力

7.2.1.1.1 航道适应能力下属指标包括：

- a) 航道侵占指数；
- b) 平均船岸距离；
- c) 平均富裕水深。

7.2.1.1.2 航道侵占指数 I_{occ} ，即自主船舶编队包络线在航道横截面的投影面积与航道横截面的投影面积的比值。航道侵占指数 I_{occ} 满足公式（1）：

$$I_{occ} = \frac{A_{con}}{A_{cha}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

A_{con} ——自主船舶编队包络线在当前航道横截面上的投影面积, 单位为平方米 (m^2);

A_{cha} ——当前航道横截面的投影面积, 单位为平方米 (m^2);

I_{occ} 越小, 代表自主船舶编队对通行航道的侵占越小, 航道适应能力越强

7.2.1.1.3 平均船岸距离 D_{avg} 满足公式 (2):

$$D_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \dots\dots\dots (2)$$

式中:

N ——编队内船舶数量, 无量纲常数;

d_i ——编队内第 i 艘自主船舶距离岸线的距离, 单位为米 (m);

D_{avg} 越小, 代表编队船舶与岸线发生触碰的风险越高, 航道适应能力越弱。

7.2.1.1.4 平均富裕水深 H_{avg} , 即编队内各船舶龙骨与水底之间垂直距离的平均值, 平均富裕水深 H_{avg} 满足公式 (3):

$$H_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - s_i) \dots\dots\dots (3)$$

式中:

N ——编队内船舶数量, 无量纲常数;

h_i ——编队内第 i 艘自主船舶当前位置的航道水深, 单位为米 (m);

s_i ——编队内第 i 艘自主船舶当前位置的吃水深度, 单位为米 (m);

H_{avg} 越小, 代表编队船舶与河床发生搁浅的风险越高, 航道适应能力越弱。

7.2.1.2 航线规划能力

7.2.1.2.1 航线规划能力下属指标包括:

a) 最优路径偏差;

b) 重规划响应时间。

7.2.1.2.2 最优航线偏差 δ_{opt} , 即自主船舶编队给出的规划航线与最优航线的偏差程度, 该指标具有一定的主观性, 可采用专家打分法进行量化, 表 1 为专家打分表格。采取专家打分法量化的最优航线偏差 δ_{opt} 满足公式 (4):

$$\delta_{opt} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \omega_i \dots\dots\dots (4)$$

式中:

R ——专家人数, 无量纲常数;

ω_i ——第 i 位专家的打分值, 无量纲常数。

δ_{opt} 越小, 代表自主船舶编队的航线规划能力越强。

表1 专家打分表

分数区间	自认语言描述
(0, 0.2]	增益极低, 基本无效
(0.2, 0.4]	增益有限, 效果欠佳
(0.4, 0.6]	增益一般, 存在改进空间
(0.6, 0.8]	增益较好, 性能明显提升
(0.8, 1.0]	增益显著, 提升效果优异

7.2.1.2.3 重规划响应时间 T_{re} , 即自主船舶编队从触发重规划决策开始到完成新航线规划所需要的时间, 重规划响应时间 T_{re} 满足公式 (5):

$$T_{re} = t_{end} - t_{start} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

t_{end} ——新航线规划完成的时刻, 单位秒 (s);

t_{start} ——触发重规划的時刻, 单位秒 (s)。

T_{re} 越小, 代表自主船舶编队的航线规划能力越强。

7.2.2 运动控制可靠性

7.2.2.1 速度控制能力

7.2.2.1.1 速度控制能力下属指标包括航速同步性、航速调节平顺性和航速控制精度。

航速同步性 V_{dev} ，即编队内部各船舶速度的平均值，航速同步性 V_{dev} 满足公式（6）：

$$V_{dev} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} |v_i - v_{i+1}| \dots\dots\dots (6)$$

式中：

N ——编队内船舶数量，无量纲常数；

v_i ——第 i 艘自主船舶的航速，单位为节（kn）。

V_{dev} 越小，代表自主船舶编队的速度控制能力越强。

7.2.2.1.2 航速调节平顺性 σ_{speed} ，即编队内部各自主船舶执行航速变更过程的连续性、稳定性，在任意观测时间段 T 内，航速调节平顺性 σ_{speed} 满足公式（7）：

$$\sigma_{speed} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} |j_i(t)|^2 dt} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

N ——编队内船舶数量，无量纲常数；

$j_i(t)$ ——第 i 艘自主船舶的瞬时加速度变化率，单位为米每三次方秒（ m/s^3 ）。

σ_{speed} 越小，代表自主船舶编队的速度调节越平顺。

7.2.2.1.3 航速控制精度 ΔV ，指编队内部各船实际速度与计划航速差值的平均值。航速控制精度 ΔV 满足公式（8）：

$$\Delta V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |v_i^{real} - v_i^{reference}| \dots\dots\dots (8)$$

式中：

N ——编队内船舶数量，无量纲常数；

v_i^{real} ——为第 i 艘自主船舶的实际航速，单位为节（kn）；

$v_i^{reference}$ ——为第 i 艘自主船舶的期望航速，单位为节（kn）。

ΔV 越小，代表自主船舶编队的速度控制精度越高。

7.2.2.2 位置控制能力

7.2.2.2.1 位置控制能力下属指标包括：

- 航迹保持能力；
- 平均纵向间距；
- 横向偏移量。

7.2.2.2.2 航迹保持能力 E_{trk} ，即编队内部各船航迹与计划航线差值的平均值，航迹保持能力 E_{trk} 应满足公式（9）：

$$E_{trk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \dots\dots\dots (9)$$

式中：

N ——编队内船舶数量，无量纲常数；

S_i ——第 i 艘自主船舶在当前时刻的实际位置和计划航线位置间的距离，单位为米（m）。

E_{trk} 越小，代表自主船舶编队的位置控制能力越强。

7.2.2.2.3 平均纵向间距 D_{long} ，即编队内部各船纵向船间距的平均值，平均纵向间距 D_{long} 应满足公式（10）：

$$D_{long} = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} X_i \dots\dots\dots (10)$$

式中：

N ——编队内船舶数量，无量纲常数；

X_i ——第 i 艘自主船舶在当前时刻与前船的纵向距离，单位为米（m）。

D_{long} 越小，代表自主船舶编队的位置控制能力越强。

7.2.2.2.4 横向偏移量 D_{lat} ，即编队内部各跟随船距离领导船的横向距离的平均值，横向偏移量 D_{lat} 应满足公式（11）：

$$D_{lat} = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} Y_i \dots\dots\dots (11)$$

式中:

N ——编队内船舶数量, 无量纲常数;

Y_i ——第 i 艘跟随船在当前时刻与领导船的横向距离, 单位为米 (m)。

D_{lat} 越小, 代表自主船舶编队的位置控制能力越强。

7.2.2.3 姿态控制能力

7.2.2.3.1 姿态控制能力下属指标包括:

a) 航向控制精度;

b) 舵角调节平顺性。

7.2.2.3.2 航向控制精度 $\Delta\theta$, 即编队内部各船当前期望航向与实际航向差值的平均值, 航向控制精度 $\Delta\theta$ 应满足公式 (12):

$$\Delta\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i \dots\dots\dots (12)$$

式中:

N ——编队内船舶数量, 无量纲常数;

θ_i ——第 i 艘自主船舶在当前时刻的真实航向与期望航向的差值, 单位为度 ($^\circ$)。

$\Delta\theta$ 越小, 代表自主船舶编队的姿态控制能力越强。

7.2.2.3.3 舵角调节平顺性 σ_{rudder} , 即编队内部各自主船舶执行航向变更过程的连续性、稳定性, 在任意观测时间窗口 T 内, 舵角调节平顺性 σ_{rudder} 应满足公式 (13):

$$\sigma_{rudder} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left| \frac{d\delta_i(\tau)}{d\tau} \right|^2 d\tau} \dots\dots\dots (13)$$

式中:

N ——编队内船舶数量, 无量纲常数;

$\frac{d\delta_i(\tau)}{d\tau}$ ——第 i 艘自主船舶的舵角瞬时变化率单位为度每秒 ($^\circ/s$)。

σ_{rudder} 越小, 代表自主船舶编队的姿态控制能力越强。

7.3 实船结果评估指标

7.3.1 编队态势感知可靠性

7.3.1.1 基础感知能力

7.3.1.1.1 基础感知能力下属指标包括:

a) 目标感知精度;

b) 感知准确率。

7.3.1.1.2 目标感知精度 α_{pos} , 用于衡量自主船舶编队对目标的感知位置与目标真实位置之间的偏差程度, 目标感知精度 α_{pos} 应满足公式 (14):

$$\alpha_{pos} = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{d_{max}} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

N ——感知目标总数, 无量纲常数;

d_i ——第 i 个目标的感知位置与真实位置之间的距离, 单位为米 (m);

d_{max} ——最大可接受误差, 单位为米 (m)。

α_{pos} 越大, 代表自主船舶编队基础感知能力越强。

7.3.1.1.3 感知准确率 α_{cls} , 用于衡量自主船舶编队对于水上目标的自动识别的准确率, 感知准确率 α_{cls} 应满足公式 (15):

$$\alpha_{cls} = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

N_{total} ——编队识别处理的目标总数, 无量纲常数;

$N_{correct}$ ——编队正确识别的目标数, 无量纲常数。

α_{cls} 越大, 代表自主船舶编队基础感知能力越强。

7.3.1.2 感知协同效能

7.3.1.2.1 感知协同效能下属指标包括：

- a) 数据融合指数；
- b) 感知增益指数。

7.3.1.2.2 数据融合成功率 I_f ，即船舶编队间感知数据有效融合的程度，用于衡量自主船舶编队对于多船感知信息的整合质量，数据融合指数 I_f 应满足公式（16）：

$$I_f = \frac{I_{correct}}{I_{total}} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

I_{total} ——用于融合的数据总量，无量纲常数；

$I_{correct}$ ——成功融合的数据量，无量纲常数。

I_f 越大，代表编队感知协同效能越强

7.3.1.2.3 感知增益指数 I_g ，即自主船舶编队进行协同感知后，队内船舶感知效果的平均提升程度，用于衡量自主船舶编队中个体船舶因协同带来的感知性能增益水平，该项指标具有一定的主观性，可采用专家打分法进行量化，见表1。采取专家打分法量化感知增益指数 I_g 应满足公式（17）：

$$I_g = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R \omega_i \dots\dots\dots (17)$$

式中：

R ——专家人数，无量纲常数；

ω_i ——第 i 位专家的打分值，无量纲常数。

I_g 越大，代表编队感知协同效能越强。

7.3.2 编队通信可靠性

7.3.2.1 通信丢包率 P_{loss}

7.3.2.1.1 通信丢包率 P_{loss} ，即船舶编队间的通信报文丢包率，用于衡量通信的准确性，通信丢包率 P_{loss} 应满足公式（18）：

$$P_{loss} = 1 - \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{n_{ij}^{recv}}{n_{ij}^{sent}} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

N ——编队内船舶数量，无量纲常数；

n_{ij}^{sent} ——船舶 i 向船舶 j 发送的报文数，无量纲常数；

n_{ij}^{recv} ——船舶 j 收到来自船舶 i 的报文数，无量纲常数。

P_{loss} 越小，代表编队通信可靠性越高。

7.3.2.2 通信延迟率 P_{delay}

7.3.2.2.1 通信延迟率 P_{delay} ，即船舶编队间通信报文从发送端到接收端的过程延迟超过设定阈值的比率，用于衡量通信的实时性，通信延迟率 P_{delay} 应满足公式（19）：

$$P_{delay} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{n_{ij}^{delay}}{n_{ij}^{sent}} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

N ——编队内船舶数量，无量纲常数；

n_{ij}^{sent} ——船舶 i 向船舶 j 发送的报文数，无量纲常数；

n_{ij}^{delay} ——船舶 j 收到来自船舶 i 的超过时间阈值的报文数，无量纲常数。

P_{delay} 越小，代表编队通信可靠性越高。

7.3.3 航行决策可靠性

7.3.3.1 航道适应能力

按照7.2.1.1的要求。

7.3.3.2 航线规划能力

按照7.2.1.2的要求。

7.3.4 运动控制可靠性

7.3.4.1 速度控制能力

按照7.2.2.1的要求。

7.3.4.2 位置控制能力

按照7.2.2.2的要求。

7.3.4.3 姿态控制能力

按照7.2.2.3的要求。

中国造船工程

