

团 体 标 准

T/CSNAME 204—2026

内河自主船舶编队航行仿真测试场景库构建规范

Specification for the development of a simulation test scenario database for inland autonomous vessel fleet navigation

2026 - 06 - 05 发布

2026 - 09 - 05 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：武汉理工大学、中国船级社、交通运输部水运科学研究院。

本文件主要起草人：马枫、马勇、郭桦、孙旭、孙杰、张金奋、吴达、王秀敏。



内河自主船舶编队航行仿真测试场景库构建规范

1 范围

本文件规定了内河自主船舶编队航行仿真测试场景库构建时场景构建方法、测试目标、编队能力验证指标、评价技术体系等方面的要求。

本文件适用于内河自主船舶编队仿真测试场景库的设计、开发、验证、更新和管理。

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/T 37378 交通运输 信息安全规范
GB/T 42453 信息安全技术 网络安全态势感知通用技术要求
DB34/T 4101 智能驾驶 激光雷达与摄像头的感知数据融合接口规范
T/CIN 003 船舶智能航行系统等级划分与技术水平评定
T/CIN 004 船舶智能航行交通安全风险评估指南 通则
T/CIN 017 船舶遥控驾驶航行感知数据通用要求
交通运输部.中华人民共和国内河避碰规则.2023
中国船级社.智能船舶规范.2025

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

仿真测试场景库 simulation test scenario database, STSD
用于验证内河自主船舶编队航行控制系统性能而构建的虚拟场景集合。

3.2

编队船队可靠性 formation fleet reliability, FFR
内河自主船舶编队在协同航行过程中，维持预设功能与性能指标的能力。

3.3

自主编队能力等级划分 Formation Autonomous Navigation Capability Level, FANCL
内河自主船舶编队在协同航行过程中，实现自主航行任务的能力等级划分。

4 缩略语

下列符号适用于本文件。

AIS: 船舶自动识别系统 (Automatic identification System)
CPA: 最近会遇距离 (Closest Point of Approach)
ECDIS: 电子海图显示与信息系统 (Electronic Chart Display and Information System)
TCPA: 最近会遇时间 (Time of Closest Point of Approach)
VHF: 甚高频 (Very High Frequency)
VDES: 甚高频数据交换系统 (VHF Data Exchange System)
VTS: 船舶交通服务/系统 (Vessel Traffic Service)

5 场景构建方法

5.1 基本要求

5.1.1 测试场景构建应遵循“数据驱动、分层抽象、动态验证”的技术路径。

5.1.2 场景构建需符合《智能船舶规范》及内河航道地理信息数据安全规范，确保数据脱敏与仿真结果可复现。

5.2 真实航行数据清洗与标注

用于场景构建的既有数据应按照下列要求进行清洗与标注：

- a) 数据来源：采集内河航道历史 AIS 轨迹、VTS 监控日志、雷达/视觉感知记录、水文气象数据、海事事故报告等多源异构数据，覆盖不同航道等级（I - IV 级）、船舶类型（货船、客船等）、交通密度（低/中/高）及典型水文条件；
- b) 数据预处理：
 - 1) 采用噪声滤波、异常值剔除、时空对齐等技术，消除传感器误差与数据冲突，构建标准化时空数据集；
 - 2) 激光雷达与摄像头的时空对齐处理需遵循 DB34/T 4101 的融合接口规范，确保多源感知数据在时间同步精度不大于 50 ms、空间配准误差不大于 0.5 m 范围内一致。
- c) 场景标签化：基于可量化的事件特征（如会遇 CPA 不大于 50 m、追越相对速度不小于 2 kn、弯道曲率半径不大于 6L）对数据片段进行多维标注，标签维度应包括：事件类型、风险等级（低/中/高）、环境扰动强度（流速、能见度）、交通复杂度等，为后续参数化建模提供结构化输入。

5.3 典型场景切分与特征提取

按照下列要求对编队航行的典型场景进行切分和特征提取：

- a) 场景切分：依据任务目标（编队保持、协同避障、动态重构）、交互对象（人工驾驶船舶、静态障碍物、航道设施）及环境突变点（桥梁入口、急弯起点），按时空连续性划分场景片段；切分边界应以可检测的量化事件为依据（TCPA < 120 s、航向变化率大于 $0.5^{\circ}/s$ ）。
- b) 特征提取：从每个片段中提取可测量、可复现的关键特征参数，包括但不限于：
 - 1) 编队几何特征（纵向间距、横向偏移、队形夹角）；
 - 2) 动力学特征（相对速度、加速度、CPA/TCPA）；
 - 3) 环境特征（航道宽度、曲率半径、流速、风浪等级）；
 - 4) 交通特征（他船数量、密度、行为模式）。
- c) 场景聚类：应用机器学习算法（如 DBSCAN、层次聚类）对相似场景片段归类，识别高频场景（如密集区编队通行）与长尾场景/极端场景（如突发漂浮物避让），确保场景库覆盖典型工况与边界条件。

5.4 测试用例抽象与场景逻辑规则构建

5.4.1 测试用例应将场景特征转化为结构化、可配置的参数化测试模板，用例测试模板应明确定义以下要素，且所有参数应具备明确物理单位、合理取值范围及默认值：

- a) 核心变量：编队规模（ $N \geq 2$ ）、初始队形（纵队/横队/楔形）、船舶动力学模型；
- b) 环境扰动参数：流速（水面流速，0 m/s~3 m/s）、风速（距水面 10 m 处平均风速，0 m/s~13.8 m/s，对应 0 级~6 级风）、能见度（200 m~1 km）；
- c) 交通交互参数：他船数量、航向、速度分布；
- d) 故障注入条件（如适用）：通信中断时长、传感器失效类型、动力降级比例。

5.4.2 场景逻辑规则构建应基于《中华人民共和国内河避碰规则》及编队控制策略，构建可触发的场景逻辑规则（如“当 CPA<40 m 且相对速度大于 5 kn 时，启动协同避让”），确保测试用例符合内河航行法规与安全逻辑。

5.5 测试目标实践与有效性验证

测试目标实践与有限性验证应满足下列要求：

- a) 场景实例化：通过仿真引擎（ROS/Gazebo、Prescan、专业船舶模拟器、其他软件仿真工具等）注入动态参数，生成可执行的测试用例集，覆盖正常、边界及极端组合工况。
- b) 有效性验证：采用多维度校验机制，包括：

- 1) 需求覆盖率：覆盖第 6 章全部测试目标（安全性、可靠性等）；
 - 2) 指标可测性：输出结果能被第 7 章所列指标（如队形偏差、避障成功率）量化评估；
 - 3) 真实性比对：与原始航行数据在关键特征分布上的一致性（如间距、速度差的统计相似度不小于 85%）。
- c) 持续迭代：根据测试结果与新增数据，动态优化场景库分类粒度、参数范围及逻辑规则，适配技术演进与法规更新。

6 测试目标

6.1 安全性测试

安全性测试应包括但不限于：

- a) 编队航行系统应具备多重冗余设计与故障隔离机制，确保单点失效不影响编队整体安全，关键功能（如通信、导航、避障）须通过独立备份系统实现。
- b) 编队内船舶应实时保持动态安全距离，并基于协同感知与风险预测算法，优先保障人工驾驶船舶、障碍物及航道设施的避碰安全。
- c) 自主编队控制系统应内置可信执行环境，确保决策逻辑可追溯、运行数据可审计，且支持监管机构远程接入监督。
- d) 编队应对突发干扰（如通信中断、设备故障、极端水文条件）具备预设降级策略，包括紧急队形解散、人工接管触发及安全状态维持能力。
- e) 系统设计须遵循“人机协同优先”原则，在混合交通场景下不得剥夺或削弱人工驾驶船舶的合法航行权与优先通行权。
- f) 编队航行安全性测试的进一步分析方法与技术要求，可参考 T/CIN 003、T/CIN 004，其对风险分类、评估工具选择及阈值设定提供了通用性指导。

6.2 可靠性测试

可靠性测试应包括但不限于：

- a) 编队系统应建立全生命周期可靠性管理框架，涵盖设计冗余、故障预判模型及实时健康监测机制，确保关键子系统（通信、动力、导航）的持续可用性。
- b) 编队内船舶应支持局部故障快速隔离与自主修复能力，当单船失效时，编队可通过动态角色切换或队形重构维持整体功能完整性。
- c) 系统须预设多级降级运行模式，在通信中断、感知受限或环境突变场景下，仍能基于本地化决策保障最低安全运行状态。
- d) 编队控制算法应通过鲁棒性验证与压力测试，确保在航道流量突变、设备性能衰减或外部持续干扰下，维持队形稳定性与任务连续性。
- e) 可靠性评估须纳入真实场景数据与故障注入测试，并定期更新验证标准以适配内河水文、交通规则的动态变化。
- f) 编队可靠性设计应遵循“韧性优先”原则，兼容人工干预接口，确保紧急状态下船员或监管方可接管控制权。

6.3 实时性测试

实时性测试应包括但不限于：

- a) 编队控制系统应确保关键任务链（感知-决策-执行）的端到端时延符合预设阈值，动态航道环境下的指令响应时间须适配内河交通密集度与水文变化特征；
- b) 编队内船舶间通信须采用低时延、高可靠传输协议（如 VDES、TSN、5G URLLC）或 VHF 信道，保障队形控制指令、协同避障数据及状态同步信息的实时交互；编队间通信协议的低时延设计需符合 GB/T 37378 的信息加密与完整性校验规范；
- c) 感知系统应支持多源数据（雷达、AIS、视觉、ECDIS）的毫秒级融合处理，并基于边缘计算架构实现本地化实时决策，降低云端依赖导致的延迟风险；

- d) 编队航行算法须嵌入时间敏感型任务调度机制，优先处理避障、队形紧急调整等高风险场景的计算需求，确保关键动作的时序确定性；
- e) 系统应建立实时性监控与超时熔断机制，当通信或计算延迟超过安全阈值时，自动触发降级策略（如切换备用链路、启用简化控制模型）。网络延迟监控模块应基于 GB/T 42453 的态势感知技术要求，实现实时威胁分析与熔断决策；
- f) 实时性验证须通过硬件在环（HIL）测试与高动态场景压力测试，确保极端工况下仍满足内河自主船舶编队时敏性性能指标要求。

6.4 精准性测试

精准性测试应包括但不限于：

- a) 编队航行系统应基于高精度导航定位设备（如北斗/GNSS、激光雷达、惯性导航）与多传感器融合技术，确保船舶位姿、航速及航向的测量误差不超过内河航行安全阈值；多传感器的感知数据采集与融合需符合 T/CIN 017 的通用格式与时间同步要求；
- b) 编队协同控制算法须预设动态误差补偿机制，队形保持精度（如纵向间距、横向偏移）应满足预设容限范围，并实时适配航道曲率、流速等环境变量；
- c) 环境感知系统应具备亚米级空间分辨率与毫秒级时间同步能力，保障障碍物识别、航道边界检测及交通态势预测的准确性；
- d) 编队内船舶间数据交互须采用严格时间戳同步协议，确保状态信息、控制指令的时序一致性，避免因数据延迟或失序导致协同误差累积；
- e) 系统应建立周期性自校准与动态标定机制，针对传感器漂移、设备老化等导致的精度衰减进行自动修正，并记录校准日志备查。

7 编队能力验证指标

7.1 基本要求

7.1.1 测试数据应基于仿真测试场景库（STSD）覆盖典型、边界及极端工况，并通过第三方机构认证。

7.1.2 基于编队能力的仿真测试场景评价，应围绕编队系统在协同控制、环境适应、任务执行及风险应对等维度的综合性能，建立量化指标体系，具体核心指标包括：

- a) 队形保持精度：衡量编队在稳定航行过程中维持预定队形结构的能力。主要包括编队内船舶相对位置误差（横向偏差不大于 $\pm 1.5\text{ m}$ ，纵向间距误差不大于设定值的 $\pm 3\%$ ），弯道航行时航向同步误差不大于 $\pm 2^\circ$ 。
- b) 动态重构精度：衡量编队在队形切换、加减船舶等动态调整过程中的控制性能。主要包括重构过程中最大位姿超调量不大于 10% ，重构完成时间不大于预设值的 120% 。
- c) 协同决策效率：衡量编队系统在多种航行任务与复杂环境下进行协同规划与决策的时效性和协调一致性。可包括指令响应延迟、编队内决策同步时间、任务分配优化度等具体参数。
- d) 安全避障性能：衡量编队系统识别航行风险、实现协同避障并恢复安全航行的能力。可包括障碍物识别距离、避障动作触发时间、编队协同避障轨迹偏离度、恢复队形时间等具体参数。

7.2 协同决策效率

协同决策效率包括响应实时性、资源占用率两个指标：

- a) 响应实时性：环境感知-协同决策-执行链路的端到端延时不大于 200 ms （静态场景）或不大于 500 ms （高动态场景）。
- b) 资源占用率：编队控制算法在边缘计算单元的平均 CPU 占用率不大于 70% ，内存峰值不大于 80% 。

7.3 安全避障性能

安全避障性能包括避障成功率和安全距离合规性：

- a) 避障成功率：对静态障碍物（浮标、桥梁）避让成功率不小于 99% ，动态障碍物（人工船舶）避让成功率不小于 95% 。

- b) 安全距离合规性：编队内船舶间最小间距不小于安全阈值的 90%，与外部船舶/障碍物间距不小于《中华人民共和国内河避碰规则》要求的 1.2 倍。

7.4 环境适应性

环境适应性包括复杂航道通用率和抗干扰稳定性：

- a) 复杂航道通过率：狭窄弯道（曲率半径不大于 5 倍船长）、浅水区（水深不大于 1.5 倍吃水）的编队一次通过率不小于 90%。
- b) 抗干扰稳定性：在风力 6 级（蒲福风级，对应风速 10.8 m/s~13.8 m/s）、浪高不超过 3 级或流速不小于 3 m/s（表面流速）条件下，队形保持精度下降幅度≤初始值的 20%。

7.5 系统可靠性

系统可靠性包括故障恢复能力、连续运行时长：

- a) 故障恢复能力：通信中断后降级模式激活时间不大于 1 s，单船故障后编队重构成功率不小于 85%。
- b) 连续运行时长：无人工干预条件下，编队持续稳定运行时间不小于 24 小时（模拟测试）或不小于 8 小时（实船测试）。

8 评价技术体系

本文件构建覆盖“仿真-实验室-实船”的多层次测试验证环境，并建立以编队协同性能为核心的量化评价体系，旨在系统评估与认证内河自主船舶编队的航行能力水平。

8.1 评价体系框架

评价体系由三个维度构成：

- a) 评价维度：聚焦编队系统的核心能力，包括协同控制精度、动态适应能力、任务执行效能与风险应对能力。
- b) 测试环境：遵循“模型仿真 → 硬件在环 → 实船测试”的递进验证路径。
- c) 能力等级：依据编队自主化程度与任务复杂度，划分明确的性能等级（见 8.4）。

8.2 分级测试方法与要求

8.2.1 模型仿真测试

主要在数字仿真环境中进行，用于算法验证与大规模场景测试。重点评价编队控制模型的稳定性、协同决策逻辑的正确性及极端场景下的性能边界。应记录关键指标的连续数据，如队形保持误差、指令响应延迟、虚拟碰撞次数等。

8.2.2 实验室硬件在环测试

在配备实物操纵器、传感器模拟器及船载控制单元的仿真平台上进行。重点验证感知-决策-控制链路的实时性与可靠性，评估系统对模拟噪声、通信延迟与设备故障的容错能力。测试报告需包含定量的时序性能分析。

8.2.3 实船测试

在选定水域进行，是最终验证环节。须制定详细的测试大纲与安全保障预案。重点获取在实际水文、气象与交通环境下，编队的队形保持精度（参见 7.1.2a）、动态重构表现（参见 7.1.2b）、协同避障成功率及人机交互有效性等关键数据。所有测试须确保符合水域安全管理规定。

8.3 核心评价指标方向

评价应基于以下可量化的核心指标方向展开，具体阈值需根据船舶类型、航行区域与任务等级在测试大纲中明确：

- a) 协同控制精度：包括队形保持误差、航向同步误差、队形切换超调量与完成时间等。

- b) 动态适应能力：包括对航道弯曲度、流速变化、风力干扰的适应范围，以及恢复稳定队形的调节时间。
- c) 任务执行效能：包括编队整体航速保持精度、预定航线跟踪精度、多任务指令的完成率与平均耗时。
- d) 风险应对能力：包括对静态/动态障碍物的识别距离与准确率、协同避障决策时间、避障轨迹的平滑度与安全裕度，以及系统故障下的最小风险策略执行效果。



附录 A
(资料性)
典型仿真测试场景的构建示例

本附录通过具体案例，说明如何依据第5章所述方法，结合真实或模拟数据，完成从原始信息到可执行仿真测试用例的完整构建过程。所有示例均包含可量化参数、构建步骤与验证关联，供研发单位、测试机构在构建内河自主船舶编队仿真测试场景库时参考。

注：本附录所用数据已脱敏，参数取值基于内河典型运行统计或工程经验，不作为强制要求。

A.1 弯道交叉会遇场景（覆盖安全性与环境适应性）

A.1.1 场景背景

示例的航行场景条件如下：

- a) 航道类型：III级内河航道（如长江中游某段）；
- b) 典型事件：3艘自主货船编队（纵队）在右弯航道中与2艘人工驾驶船舶发生交叉会遇；
- c) 环境条件：晴天，能见度大于2 km；水流速度 1.6 m/s（侧向）；航道曲率半径约等于 $4.8 \times$ 船长（ $L = 65\text{ m}$ ）。

A.1.2 原始数据来源

原始数据来源于下列方式：

- a) 脱敏 AIS 轨迹数据（2023 年某月，采样频率 1 Hz）；
- b) VTS 交通日志（记录他船动态）；
- c) 水文站流速监测数据（时间对齐至 UTC+8）。

A.1.3 数据清洗与标注

对数据进行清理与标注：

- a) 清洗处理：
 - 1) 剔除 AIS 跳点（位置突变大于 50 m/s）；
 - 2) 卡尔曼滤波平滑轨迹，时空对齐误差不大于 30 ms；
 - 3) 多源融合后定位精度不大于 1.2 m（95%置信）。
- b) 场景标签：
 - 1) 事件类型：交叉会遇与弯道航行；
 - 2) 风险等级：中（CPA=42 m，TCPA=78 s）；
 - 3) 环境扰动：侧流中等（1.5 m/s~2.0 m/s）。

A.1.4 特征提取与参数化

特征提取与参数化见表A.1。

表A.1 特征及参数取值

类别	参数	取值	说明
编队配置	船舶数量	3	全自主
	初始队形	纵队	间距 $50\text{ m} \pm 1.5\text{ m}$
	航速	8 kn	恒定
他船配置	数量	2	人工驾驶
	相对航向	$+60^\circ$ （右舷交叉）	与编队首船夹角
	航速	7 kn	—
环境参数	航道曲率半径	$312\text{ m} (\approx 4.8L)$	—
	侧向流速	1.6 m/s	—
触发条件	$CPA < 50\text{ m}$ 且 $TCPA < 90\text{ s}$		启动协同避让逻辑

A.1.5 仿真实例化

仿真实例化采用下列方式：

- a) 在支持 ECDIS 底图的船舶仿真平台（如 Wärtsilä SIM™或自研仿真系统）中加载该航道数字孪生模型；
- b) 注入上述参数，生成可重复执行的测试用例；
- c) 设置感知延迟不大于 100 ms，通信周期不大于 200 ms，模拟真实系统约束。

A.1.6 验证关联

对仿真测试结果进行验证，判断其是否满足指标要求：

- a) 预期行为：编队减速并微调横向偏移，保持安全通过；
- b) 评价指标（见第 7 章）：
 - 1) 队形横向偏差不大于±1.5 m（7.1.2 a）；
 - 2) 航向同步误差不大于±2°（7.1.2 a）；
 - 3) 避障成功率不小于 95%（7.3 a）；
 - 4) 决策-执行链路时延不大于 500 ms（7.2 a）。

A.2 VDES 通信中断下的编队降级运行（覆盖可靠性与实时性）

A.2.1 场景背景

示例的航行场景条件如下：

- a) 事件类型：编队在狭窄桥区（宽度等于 2.8 乘以编队总宽）航行时，主通信链路（VDES）突发中断；
- b) 测试目标：验证系统是否能在 1 秒内激活降级策略，维持安全航行。

A.2.2 故障注入设计

故障注入参数如下：

- a) 中断方式：仿真平台主动切断 VDES 数据链；
- b) 持续时间：8 s（覆盖典型恢复窗口）；
- c) 发生时机：编队中点进入桥区前 100 m。

A.2.3 参数化建模

参数化建模方式如下：

表A.2 参数及取值

参数	取值	依据	参数
编队规模	4 艘	中型货运编队	编队规模
初始间距	45 m	狭窄航道限值	初始间距
桥区宽度	220 m	实测数据	桥区宽度
备用通信	VHF 语音+低频数据包（9.6 kbps）	符合 GB/T 37378	备用通信
降级策略	本地决策 + 领航船广播简化状态	遵循“韧性优先”原则（4.2f）	降级策略

A.2.4 验证关联

对仿真测试结果进行验证，判断其是否满足指标要求：

- a) 降级模式激活时间不大于 1 s（6.4a）；
- b) 队形纵向拉伸不大于 15%（即最大间距不大于 51.75 m）；
- c) 无碰撞、无触碰桥墩；
- d) 连续性要求：任务未中断，通过桥区后自动恢复主通信（5.4c）。

A.3 典型场景参数速查表（供快速参考）

表A.3为典型场景参数的速查示例。

表A.3 典型场景参数速查表

场景类别	核心输入参数	推荐取值范围	数据来源依据	对应第 6 章指标
密集追越	相对速度差	$\geq 3 \text{ kn}$	AIS 历史 90 分位	6.1a, 6.2b
	航道宽度	$\leq 3.0 \times \text{船宽}$	III级航道标准	6.3a
漂浮物避障	障碍出现距离	150~200 m	事故报告统计	6.2a
	响应窗口	$\leq 20 \text{ s}$	感知-制动链路仿真	6.1a
单船动力失效	减速率	$-0.25 \sim -0.35 \text{ m/s}^2$	故障注入实验	6.4b
	故障位置	队列中部	最不利工况	6.4b
浅水效应	水深/吃水比	1.2~1.5	内河通航规范	6.3a
注：以上参数可根据具体水域、船型进行缩放调整，但应确保测试边界覆盖第5章所述“极端组合”。				



