

团 体 标 准

T/CSNAME 200—2026

内河自主船舶编队航行 RAMSI 验证与评估 指南

Guidelines for RAMSI verification and evaluation of inland waterway autonomous
ships convoy navigation

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 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 缩略语 3

5 评估原则 4

 5.1 总体原则 4

 5.2 影响因素 4

 5.3 验证评估要素 6

6 验证程序 6

7 RAMSI 验证评估指标体系 7

 7.1 量化验证评估指标体系 7

 7.2 可靠性评价指标 8

 7.3 Δt ——统计的时间区间。可用性评价指标 9

 7.4 可维护性评价指标 11

 7.5 安全性评价指标 12

 7.6 互操作性评价指标 13

8 指标数据采集 14

 8.1 数据采集原则 14

 8.2 数据采集内容 14

 8.3 数据来源与采集方法 15

9 评估结果综合评价 15

10 提升措施制定 16

11 报告 16

附录 A（资料性） 自主船舶编队系统 RAMSI 典型参数 17

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：杨雪、章文俊、周翔宇、孟祥坤、孙旭、岳鹏、马勇、马枫、王晨阳、段宇、张逸卓、任晓航、王英杰、刘安培。



内河自主船舶编队航行 RAMSI 验证与评估指南

1 范围

本文件提供了内河自主船舶编队航行RAMSI（可靠性、可用性、可维护性、安全性、互操作性）验证评估的原则、程序、要求、指标体系构建及数据采集等方面的技术指南。

本文件适用于内河自主船舶编队设计、试验验证及运营阶段的RAMSI验证评估活动。

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。

ISO/TS 23860:2022 船舶和海上技术与自动船舶系统相关的词汇 (Ships and marine technology — Vocabulary related to autonomous ship systems)

3 术语和定义

ISO/TS 23860:2022界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

自主船舶编队 autonomous ships convoy

由一艘配备船员的领导船与多艘由远程驾控或自主航行技术控制的低载人或无人跟随船共同组成的多船协同航行系统。

3.2

自主船舶编队失效 autonomous ships convoy fault

可能导致自主船舶编队功能单元无法正常执行所需功能的异常情况。

注：自主船舶编队功能是指自主船舶编队航行、保护人员安全与海洋环境的过程中需要执行的任务、承担的责任和履行的义务。如自主船舶操控、维护人的安全、保护海洋环境等。

3.3

可靠性 reliability

在规定时间内和特定操作场景下，自主船舶编队系统能够持续、稳定地完成其设计功能的能力。

3.4

可用性 availability

衡量系统在未来某个时间点或一段时间内能够正常运行和执行任务的程度。

3.5

可维护性 maintainability

在特定的使用条件下，自主船舶编队维持或恢复到能够按要求执行其功能的状态的能力。

3.6

安全性 safety

自主船舶编队航行过程中人员伤害、财产损失或环境损害的风险被控制在可接受水平内的状态。

3.7

互操作性 interoperability

系统、设备或应用程序在异构环境中通过兼容性接口及信息交互功能，实现不同制造商、类型的船舶及岸基控制系统无缝交互并执行协同任务。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

RAMSI：可靠性（Reliability）、可用性（Availability）、可维护性（Maintainability）、安全性（Safety）、互操作性（Interoperability）
MTBF：平均失效间隔时间（Mean Time between Failure）
MTTF：平均失效前时间（Mean Time to Failure）
MTBM：平均维修间隔时间（Mean Time Between Maintenance）
MTTR：平均维修时间（Mean Time to Repair）

5 评估原则

5.1 总体原则

- 自主船舶编队航行RAMSI评估宜符合以下原则：
- a) 科学性；
 - b) 系统性；
 - c) 可操作性。

5.2 影响因素

- 自主船舶编队航行系统RAMSI受到系统条件、运行条件、维护条件三个因素影响，如图1所示：
- a) 系统条件：宜涵盖单船的维修性、内部干扰与技术特性，同时关注编队层面因船型异构、软件差异、航行场景多样性及协同控制能力产生的交互影响；
 - b) 运行条件：宜重点考察通航环境（自然与交通条件）、航行任务复杂性、人的因素及操作规程，分析其对编队安全性与可靠性的综合作用；
 - c) 维护条件：可从人的因素、维护规程完善性、状态监测与故障诊断能力三个维度，评估其对编队可用性与可维护性的支撑机制。

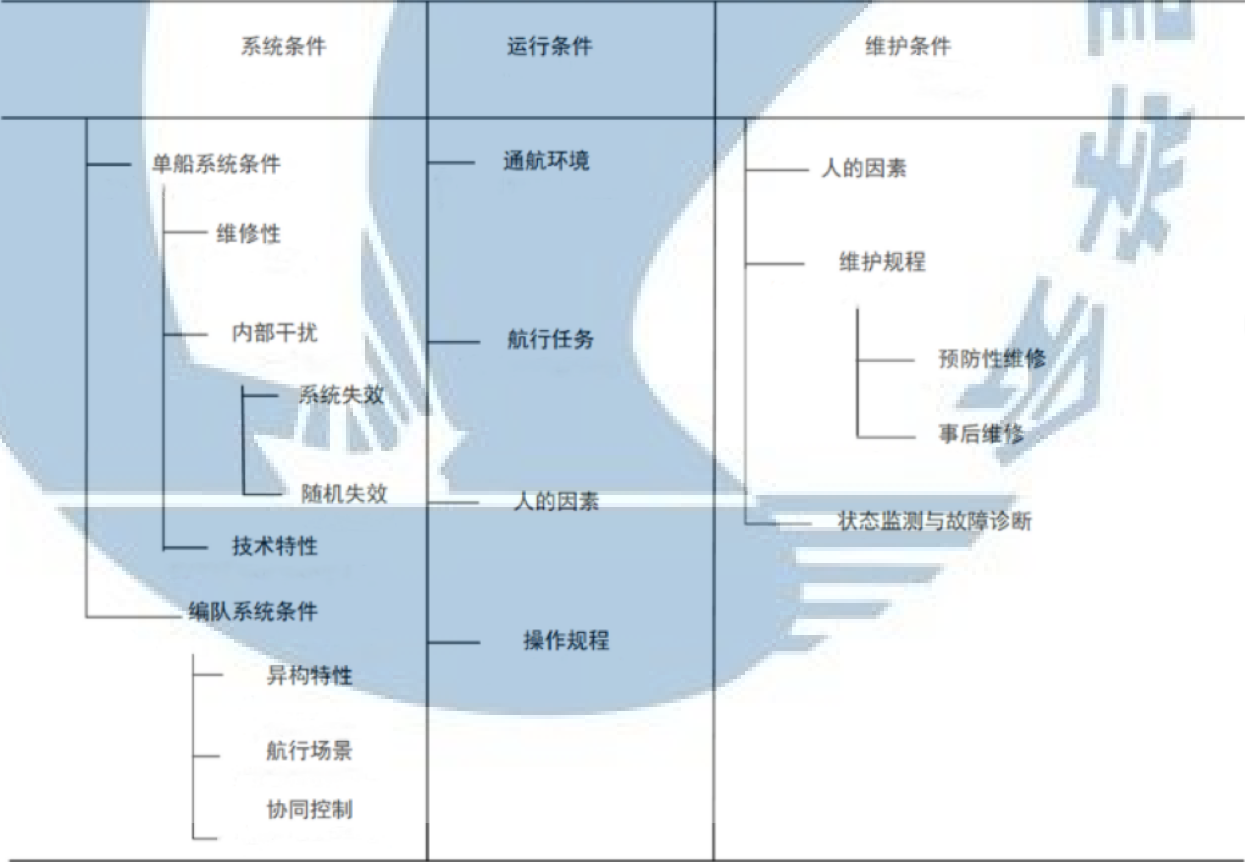


图1 影响自主船舶编队航行 RAMSI 的因素

5.2.1 系统条件

5.2.1.1 单船系统条件

单船系统条件主要涉及技术特性、内部干扰和维修性三个方面：

- a) 技术特性：主要体现为编队内船舶自主化水平与人机交互界面设计质量等。技术特性决定了单船系统能否有效实现自主编队航行并便于人工干预操作；
- b) 内部干扰：主要包括系统性失效与随机失效两类因素。其中系统性失效包括需求缺陷、设计缺陷、制造缺陷、软件缺陷、操作规程缺陷及人为失误等，主要体现系统设计、开发与维护过程对可靠性的直接影响。随机性失效体现为设备磨损、材料退化、老化和耐久性不足等随机因素对系统可靠性和可用性的影响；
- c) 维修性：单船的设备设计是否易于维护，将直接影响维护过程的效率和维修时间，从而进一步影响整体可用性和可维护性。

5.2.1.2 编队系统条件

编队系统条件主要表现为异构特性、航行场景与协同控制能力：

- a) 异构特性：编队船舶可能存在船型差异、设备差异、软件差异等，这些差异性因素直接决定了互操作性与可靠性指标的实现难度；
- b) 航行场景：不同的航行场景（巡航、会遇、过闸等）对编队可靠性、安全性和可用性产生差异化影响，不同场景下环境干扰和要求均有所不同；
- c) 协同控制：编队通信能力、系统兼容性、抗干扰适应性等因素直接影响自主船舶编队在运行过程中各项协同任务的可靠性、安全性与互操作性。

5.2.2 运行条件

运行条件影响因素主要包括通航环境、航行任务、人的因素以及操作规程：

- a) 通航环境：
 - 1) 自然条件：包括航道宽度、航道深度、弯曲半径、水文气象条件（如风、浪、流等），直接影响自主船舶编队的安全性与可靠性；
 - 2) 交通条件：包括船舶密度、其他船舶的性能与行为特性等因素，这些因素显著影响自主船舶编队的碰撞风险与搁浅风险等；
 - 3) 通信条件：包括船舶与船岸间常规通信与应急通信的可用性和可靠性，直接影响自主船舶编队的互操作性与可靠性。
- b) 航行任务：任务类型（常规航行任务、特定任务要求）以及任务执行过程中对于航行状态的监测对自主船舶编队的可靠性、可用性和安全性都有显著影响，不同的任务需求可能改变风险可接受水平。
- c) 人的因素：自主船舶编队航行过程中，人为干预仍是避免事故发生的重要手段。过程中人为决策失误，以及面对危险事件时的纠正措施不当等因素都将显著影响编队航行的安全性与可靠性。
- d) 操作规程：操作规程的合理性和全面性，是确保编队任务执行可靠性与安全性的基本保障之一，也是避免人为失误的重要措施。规程错误、不充分或实施不严格，都可能增加安全航行风险。

5.2.3 维护条件

维护条件主要包括人的因素、维护规程及状态监测与故障诊断能力三个方面：

- a) 人的因素：自主船舶编队发生故障，人员维修仍然是使自主船舶编队恢复功能的主要方式。维护人员技能水平及执行规范的把控能力等都是决定自主船舶编队可靠性和可维护性的重要因素。
- b) 维护规程：
 - 1) 预防性维护：包括定期维修和视情维修两种模式。合理的维护规程能显著提高系统的可用性和可靠性，减少非计划停机的风险。
 - 2) 事后维护：在出现故障时，维护团队将启动故障诊断与维修流程，并结合反馈进一步优化预防性维护策略，以持续提升编队可用性和可维护性。

- c) 状态监测与故障诊断：状态监测技术与故障诊断系统的精度与及时性直接影响维护决策的及时性与准确性，对系统的可用性和安全性产生重要影响。

5.3 验证评估要素

5.3.1 可靠性要素

自主船舶编队系统宜确保在规定的操作场景和时间内持续稳定运行，避免因设备故障、软件错误或环境干扰导致功能失效或航行中断。

5.3.2 可用性要素

自主船舶编队系统需在任务需求时保持即时可用状态，最大限度减少计划外停机时间，并支持快速恢复功能。

5.3.3 可维护性要素

自主船舶编队系统设计宜便于快速诊断、修复故障，并降低维护复杂度与成本。

5.3.4 安全性要素

自主船舶编队系统需将航行风险（碰撞、搁浅、人员伤亡等）控制在可接受水平内，并具备应急响应能力。

5.3.5 互操作性要素

自主船舶编队系统需确保编队内异构系统、设备及外部环境间无缝协作，支持高效数据交互与任务协同。

6 验证程序

开展自主船舶编队航行RAMSI验证评估工作的基本流程如图2所示。



图2 自主船舶编队航行 RAMSI 验证程序

7 RAMSI 验证评估指标体系

7.1 量化验证评估指标体系

RAMSI量化验证评估指标是对于可靠性，可用性，可维护性，安全性和互操作性数学属性的定量化描述。RAMSI量化验证评估指标体系是五个维度量化指标的集合，包括可靠性量化验证评估指标，可用性量化验证评估指标，可维护性量化验证评估指标，安全性量化验证评估指标和互操作性量化验证评估指标五大类型共计19个子指标。RAMSI验证评估指标体系如图3所示。RAMSI验证评估中常用的典型参数参见附录A。

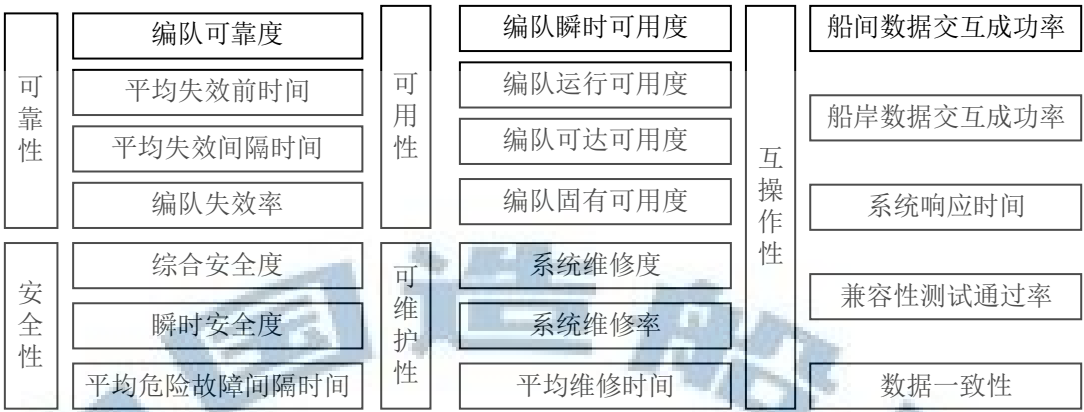


图3 自主船舶编队航行 RAMS I 验证评估指标体系

7.2 可靠性评价指标

7.2.1 概述

可靠性验证评估指标包括编队可靠度、平均失效前时间、平均失效间隔时间和编队失效率四个子指标。

7.2.1.1 编队可靠度

编队可靠度 $R(t)$ 是指在规定的航行条件、任务要求和时间范围内，编队系统能够协同完成预定功能（如队形保持、避障导航、任务执行等）的概率。可以用编队整体寿命 T 超过规定时间 t 的概率来表示，其计算方法如公式（1）所示。

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 $f(t)$ ——失效概率密度函数；
 T ——编队整体寿命。

可靠度函数也可通过统计的方法获得，计算方法如公式（2）所示。

$$R(t) = \frac{N-n(t)}{N} \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 N ——自主船舶编队航行次数；
 $n(t)$ ——编队功能失效的次数。

7.2.2 平均失效前时间

平均失效前时间 $MTTF$ 用自主船舶编队能够正常运行的时间期望表示，计算方法如公式（3）所示。

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 $f(t)$ ——失效概率密度函数。

7.2.3 平均失效间隔时间

平均失效间隔时间 $MTBF$ 是指在规定的条件下和规定的时间内自主船舶编队总运行时间与失效次数之比。

设自主船舶编队在航行过程中发生了 N_0 次故障，故障修复后继续投入使用，每次工作持续时间为 $Ttf_1, Ttf_2, \dots, Ttf_n$ ，则平均故障间隔时间 $MTBF$ 计算方法如公式（4）所示。

$$MTBF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} Ttf_i \dots\dots\dots (4)$$

式中：

N_0 ——编队航行过程中发生故障的次数；
 $n(t)$ ——编队功能失效的次数；
 Tt_{fi} ——编队正常工作状态的时间。

7.2.4 编队失效率

编队失效率 λ 指自主船舶编队无故障航行到某时刻，在该时刻后单位时间内发生失效的概率。失效率随时间的变化情况可通过失效率函数 $\lambda(t)$ 来表示，也称为故障率函数或风险函数。计算方法如公式(5)所示。

$$\lambda(t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} f(t)dt}{\Delta t} \dots\dots\dots (5)$$

式中：
 $\lambda(t)$ ——失效率函数；
 $f(t)$ ——失效概率密度函数；
 t ——编队功能失效的次数；
 Δt ——编队正常工作状态的时间。

失效率度函数也可通过统计的方法获得。假设进行了 N 次自主船舶编队航行，在时间 t 内，因通信中断、导航故障或协同失控等问题导致编队功能失效的次数为 $n(t)$ ，则编队失效度的计算方法如公式(6)所示。

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t} \frac{1}{N-n(t)} \dots\dots\dots (6)$$

式中：
 N ——编队航行次数；
 $n(t)$ ——编队功能失效次数；
 $\Delta n(t)$ ——在 Δt 时间区间内，编队功能失效的次数；
 Δt ——统计的时间区间。

7.3 可用性评价指标

7.3.1 概述

可用性验证评估指标宜包括：

- a) 编队瞬时可用度；
- b) 编队运行可用度；
- c) 编队可达可用度；
- d) 编队固有可用度。

特定时间段内，自主船舶编队不同状态的时间构成可细分如图4所示。其中，能正常运作时间可分为不工作时间、待命时间、反应时间和任务时间四部分；而无法正常运作时间则可分为维修时间（包含故障修复性维修和预防性维护保养）以及延误时间（包括物资装备保障延误和指挥管理协调延误）。

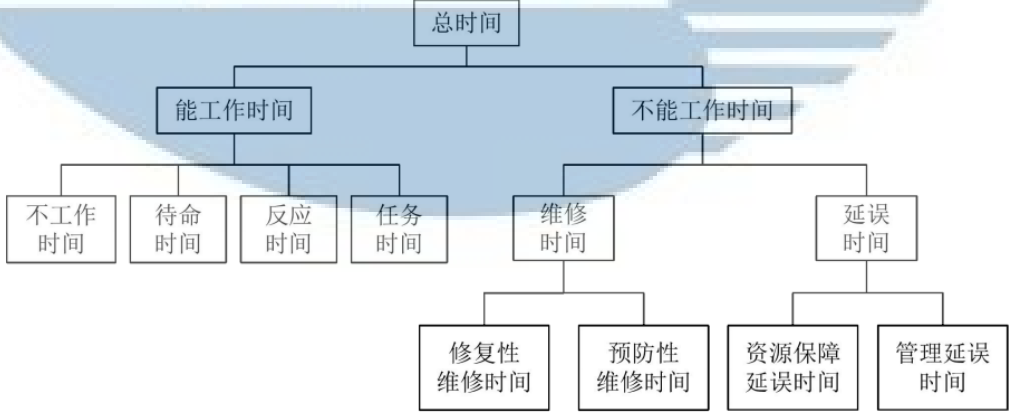


图4 船舶编队不同状态的时间构成

船舶编队不同状态时间的定义见表1。

表1 船舶编队不同状态时间定义

名称	定义
能工作时间	船舶编队处于执行其规定功能状态的在编时间
不工作时间	船舶编队能工作,但不要求其工作的时间
待命时间	船舶编队从准备好随时可执行其任务到开始执行任务的等待时间。在这段时间内,不进行维修或妨碍任务开始的其他活动
反应时间	船舶编队从要求执行某项任务的瞬间开始到准备好执行任务所需时间。它是产品从不工作状态转入工作状态所需的时间
任务时间	船舶编队执行某项规定任务剖面所用的能工作时间
不能工作时间	船舶编队处于列编,但不处于执行其规定功能状态的时间
修复性维修时间	对船舶编队进行修复性维修所用的时间
预防性维修时间	对船舶编队进行预防性维修所用的时间
资源保障 延误时间	因等待所需的保障资源而未能及时对系统进行保障所延误的时间。如等待备件、维修人员、保障设备、信息及适当的环境条件等所延误的时间
管理延误时间	因管理或指挥协调原因导致的维修或保障活动延误时间

7.3.2 编队瞬时可用度

编队瞬时可用度 $A(t)$ 指自主船舶编队在特定的 t 时刻正常运行的概率,计算方法如公式(7)所示。

$$A(t) = P\{x(t) = 1\} \dots\dots\dots (7)$$

其中, $x(t)$ 服从0—1分布:

$$x(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻系统正常} \\ 0, & t \text{ 时刻系统故障} \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

在任意给定时刻 t ,仅在以下情况自主船舶编队处于正常运转状态,其一为编队在 $[0, t]$ 时间区间内未曾发生失效,其二为编队在 $[0, t]$ 时间区间内发生过失效,且最后一次修复完成的时间点为 u ($u < t$)。 t 时刻的自主船舶编队瞬时可用度的计算方法如公式(9)所示。

$$A(t) = R(t) + \int_0^u R(t-u)m(u)du \dots\dots\dots (9)$$

式中:
 $R(t)$ ——可靠度函数;
 $M(u)$ ——维修密度函数。

7.3.3 编队运行可用度

编队运行可用度 $D(t)$ 指自主船舶编队系统或子系统在使用周期内,正常运行时间所占的百分比,考虑修复性维修和预防性维修,同时也考虑保障延迟的影响。计算方法如公式(10)、(11)所示。

$$A_0 = \frac{nt}{tt} \dots\dots\dots (10)$$

$$D(t) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \dots\dots\dots (11)$$

式中:
 t_i ——时间段内系统工作的实际时间;
 T_i ——时间段的设计工作时间;
 nt ——正常可用时间;
 tt ——总时间。

7.3.4 编队可达可用度

编队可达可用度 A_α 指考虑自主船舶编队预防性维修和修复性维修,未考虑备件和管理延误的可用性参数,计算方法如公式(12)所示。

$$A_\alpha = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$MTBM$ ——平均维修间隔时间；

$\bar{M}$ ——预防性维修和修复性维修停机时间。

7.3.5 编队固有可用度

编队固有可用度 A_i 指仅考虑自主船舶编队的修复性维修，不考虑预防性维修和延迟的可用性参数，计算方法如公式（13）所示。

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (13)$$

式中：

$MTBF$ ——平均失效间隔时间；

$MTTR$ ——平均维修时间。

7.4 可维护性评价指标

7.4.1 概述

可维护性验证评估指标包括系统维修度、系统维修率和平均维修时间三个子指标。

7.4.2 系统维修度

系统维修度 $M(\tau)$ 是指在既定的作业条件和规定的维修期限内，按照既定程序和方法对编队航行系统进行维修后，系统在维修时间不超过 τ 的条件下，能够保持或恢复到满足预定功能要求状态的概率，反映了系统在规定时间内实现功能恢复的能力。设维修时间为随机变量 T ，则系统在维修启动时刻至某一时刻 τ 内完成修复并恢复至功能完备状态的概率即为 $M(\tau)$ ，计算方法如公式（14）所示。

$$P(T \leq \tau) = M(\tau), \quad 0 \leq M(\tau) \leq 1 \quad (14)$$

如果维修度函数 $M(\tau)$ 连续可导，则 $M(\tau)$ 的导数即为维修密度函数，则有：

$$m(\tau) = \frac{dM(\tau)}{d\tau} \quad (15)$$

$$M(\tau) = \int_0^{\tau} m(\tau) d\tau \quad (16)$$

式中：

$m(\tau)$ ——维修密度函数；

$M(\tau)$ ——系统维修度函数；

τ ——维修时间。

7.4.3 系统维修率

系统维修率 $\mu(t)$ 是指在维修时间达到某一时刻 τ 时，尚未完全修复的编队航行系统在 τ 时刻之后单位时间内完成修复的条件概率，反映了系统在不同维修阶段中实现功能恢复的即时修复能力，计算方法如公式（17）、（18）所示。

$$\mu(\tau) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\tau} P(\tau \leq T \leq \tau + \Delta\tau | T > \tau) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta\tau} \frac{P(\tau \leq T \leq \tau + \Delta\tau)}{P(T > \tau)} \quad (17)$$

$$\mu(\tau) = \frac{m(\tau)}{1 - M(\tau)} \quad (18)$$

式中：

$M(\tau)$ ——系统维修度函数；

$m(\tau)$ ——系统维修密度函数。

7.4.4 平均维修时间

平均维修时间 $MTTR$ 是维修时间 T 的数学期望，计算方法如公式（19）所示。

$$MTTR = \bar{\tau} = \int_0^{\infty} \tau m(\tau) d\tau \quad (19)$$

式中：

$m(\tau)$ ——系统维修密度函数；

τ ——维修时间。

平均维修时间评估需综合考虑各类维修活动所耗费的时间因素。这些因素通常包括故障诊断与确认时间、备件调配与获取时间、维修团队响应时间、维修任务执行与记录时间，以及系统故障恢复至可

用状态所需的时间。通过整合上述时间参数,平均维修时间能够量化系统在单位时间内完成故障修复的效率,反映自主船舶编队航行系统的整体维修响应能力与运行保障效能。

若维修率 $\mu(\tau)$ 符合指数分布,则MTTR可定义为:

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (20)$$

式中:

μ ——系统维修率。

维修度 $M(t)$ 可表示为:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-\frac{t}{MTTR}} \quad (21)$$

式中:

μ ——系统维修率;

t ——维修时间。

7.5 安全性评价指标

7.5.1 概述

安全性验证评估指标宜包括:

- 综合安全度;
- 瞬时安全度;
- 平均危险故障时间。

7.5.2 综合安全度

综合安全度 R 是描述自主船舶编队在航行过程中所达到的整体安全水平,具体由潜在风险的严重程度决定,可通过对风险的量化评估来体现,计算方法如公式(22)所示。

$$R = \{s_i, f_i, c_i\} \quad (22)$$

式中:

s_i ——第 i 个潜在事故场景,包括事故场景的名称、简要定义和具体内容描述;

f_i ——示事故场景 s_i 的可能性(例如发生频率)的估计值;

c_i ——事故场景 s_i 所产生的后果的合集,用以描述事故对于所有相关资产(人员、财产和环境)造成的各种类型伤害或破坏的多维向量,并伴随相应的发生概率,以完整体现事故场景的潜在影响。

7.5.3 瞬时安全度

瞬时安全度 S 是量化内河自主船舶编队在特定时刻(t 时刻)安全运行概率的综合指标,该指标旨在反映编队在短时段内应对各类风险的有效程度。

评估时,宜全面考虑以下关键风险维度:

- 协同规避风险;
- 操纵风险;
- 信息风险;
- 环境风险;
- 应急处置风险。

瞬时风险评估参考参数示例见表2。计算方法如公式(23)所示。评估参数和权重可以根据评估的实际情况来选取和设置。评估参数及对应权重可根据实际航行场景、评估对象技术配置及评估目标,从表2中选择相关维度的参数进行求和。未选取的参数无需纳入计算,已选参数的权重需重新归一化处理。

$$S = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times \omega_i \quad (23)$$

式中:

n ——所选取的风险评估参数个数;

α_i ——风险评估参数,由评估者根据评估实际情况选取;

ω_i ——风险评估参数的权重,由评估者根据评估实际情况确定。

表2 瞬时风险评估参数

风险维度	风险评估参考参数示例	权重
协同避碰风险	编队内船舶间安全距离 α_1	ω_1
	船舶与障碍物间安全距离 α_2	ω_2
	自主协同避碰成功率 α_3	ω_3
	船舶最小会遇距离 α_4	ω_4
	船岸最小安全间距 α_5	ω_5
	最小富裕水深 α_6	ω_6
操纵风险	航迹控制偏差 α_7	ω_7
	航速控制偏差 α_8	ω_8
	船岸通信丢包率 α_9	ω_9
	船舶通信丢包率 α_{10}	ω_{10}
信息风险	网络攻击防御成功率 α_{11}	ω_{11}
	数据投毒防御成功率 α_{12}	ω_{12}
环境风险	抗环境干扰性能 α_{13}	ω_{13}
应急处置风险	岸端安全应急接管成功率 α_{14}	ω_{14}

7.5.4 平均危险故障时间

平均危险故障间隔时间 $MTBF(H)$ 是指在船舶编队执行任务期间，相邻两次危险故障之间的平均时间间隔，计算方法如公式（24）所示。

$$MTBF(H) = \frac{T}{N} \dots\dots\dots (24)$$

式中：
 T ——编队在特定任务期间的总运行时间；
 N ——任务期间船舶编队出现的危险故障总次数。

7.6 互操作性评价指标

7.6.1 概述

互操作性验证评估指标包括船间数据交互成功率，船岸数据交互成功率，系统响应时间，兼容性通过测试和数据一致性五个子指标。

7.6.2 船间数据交互成功率

船间数据交互成功率 S_1 用于衡量船舶编队内各船舶之间成功实现数据交互的次数与数据交互尝试总次数的比例。在船舶编队协同作业场景中，这一指标能有效评估不同船舶系统间的数据兼容性，以及船舶间通信链路的传输效率，助力优化船舶编队的协同作业能力与通信效能，计算方法如公式（25）所示。

$$S_1 = \frac{N_1}{T_1} \times 100\% \dots\dots\dots (25)$$

式中：
 T_1 ——船间数据交互尝试总次数；
 N_1 ——船间成功的数据交换次数。

7.6.3 船岸数据交互成功率

船岸数据交互成功率 S_2 是指船舶与远程操作中心（ROC）之间成功实现数据交互的次数与数据交互尝试总次数的比例。船岸交互明确了互操作性在船舶运营体系中的特定指向，突出其在远程操作中的关键作用，即确保船舶与ROC之间能够有效沟通与协作，计算方法如公式（26）所示。

$$S_2 = \frac{N_2}{T_2} \times 100\% \dots\dots\dots (26)$$

式中：
 T_2 ——船岸数据交互尝试总次数；
 N_2 ——船岸成功的数据交换次数。

7.6.4 平均响应时间

在船舶编队系统中，平均响应时间 AT 是指系统响应各类请求所花费的时长，涵盖通信过程时间以及系统内部处理数据所需的时间。通过平均响应时间，可对船舶编队系统实时交互的灵敏性和运行效率开展量化评估，计算方法如公式（27）所示。

$$AT = \frac{PT}{TR} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

PT ——单次请求响应时间；

TR ——总请求次数。

7.6.5 兼容性测试通过率

兼容性测试通过率 PR 是指船舶编队通过特定测试案例来验证船舶编队里不同系统或设备的兼容性。主要用于验证不同厂商设备在相同标准下的互操作性。一般根据测试案例的通过率和失败率进行评估，计算方法如公式（28）、（29）所示。

$$PR = \frac{CP}{TE} \times 100\% \dots\dots\dots (28)$$

$$FR = 1 - PR \dots\dots\dots (29)$$

式中：

CP ——测试通过案例数；

TE ——执行测试案例总数。

7.6.6 数据一致性

数据一致性 DC 是指自主船舶编队系统航行过程中各船舶之间传输数据的准确性与统一性，主要用于衡量编队内船舶系统数据实时同步和更新的精确程度。通过对比编队内各船舶系统中相同数据的匹配程度，评估船舶编队航行的协同性与可靠性，计算方法如公式（30）所示。

$$DC = \frac{DI}{TI} \times 100\% \dots\dots\dots (30)$$

式中：

DI ——一致数据项数；

TI ——总检查项数。

8 指标数据采集

8.1 数据采集原则

数据采集工作宜遵循以下基本原则，以确保数据的可用性和评估结果的准确性：

- a) 来源一致性原则：为提高数据的可比性，宜优先采集自相同或相似技术条件下的设备与系统；
- b) 状态代表性原则：采集的数据宜能代表系统稳定的运行状态，同时也可根据评估目标，考虑包含启动、寿命末期等特定阶段的数据；
- c) 数据可溯性原则：对所有数据源应进行清晰标识和记录。例如，对于实验室测试数据，宜明确区分其与实际运行数据，并标注其获取条件；
- d) 统计充分性原则：数据基础宜足够广泛，失效事件的数量宜足够大，以减少偶然偏差对评估结果的影响，对于数据稀少的情况可采用专家评估数据；
- e) 场景适用性原则：数据宜反映实际应用场景的特殊条件，如维修数据需考虑当地保障能力；
- f) 边界匹配原则：所采集数据的系统边界（如设备范围、功能模块）宜与评估分析的对象尽可能保持一致。若无法完全匹配，则需明确说明所采用的假设条件，以界定数据的适用范围。

8.2 数据采集内容

数据采集内容为关键设备、子系统及编队整体的运行数据，包括但不限于下列：

- a) 水文气象；
- b) 船舶态势；
- c) 无故障运行时间；

d) 航行参数。

8.3 数据来源与采集方法

收集数据的来源可参照但不限于以下方式：

- a) 可靠性试验分析与实际运维数据统计；
 - 1) 通过硬件可靠性试验分析采集在各种负载和故障情景下的性能数据；通过软件可靠性试验分析采集单位时间内软件系统发生故障的次数（故障率）、已测试功能和路径的比例（测试覆盖率）、每千行代码中的故障数量（故障密度）等数据；通过人因可靠性试验分析采集与人员在特定试验环境下表现相关的生理、心理指标、反应时间、行为状态等数据；
 - 2) 在自主船舶编队投入运营后，依据本文件取得符合认证要求的船舶设备、计算机软件及嵌入式软件的使用方宜当定期记录并汇总的相关数据，包括但不限于软硬件故障、人为失误及发生时的通航环境、船舶状态、交通态势等相关信息，以及其他运维数据；
- b) 专家评估：若历史数据不可得，可通过相关领域专家对相关参数进行定性分析；
- c) 仿真测试：针对 RAMSI 验证评估指标的特点，搭建仿真测试场景库，包括但不限于正常航行场景、故障场景、高交通流密度场景、极限操作条件场景、人因相关场景等，利用仿真测试获取 RAMSI 指标参数相关数据。

9 评估结果综合评价

所有子指标均符合要求后，应计算RAMSI验证评估综合指数以评价RAMSI总体水平。在进行综合评价前，应对8.2中量纲各异的RAMSI子指标进行去量纲处理，以消除不同指标单位和数量级对评估结果的影响。采用适当的标准化方法（如标准化法、极差正规法等）将各指标实测值转换为无量纲的标度值后，可按公式（31）计算RAMSI综合评价指数 Z 。

$$Z = \sum_{i=1}^n A_i \times \omega_i \dots\dots\dots (31)$$

式中：

Z ——RAMSI验证评估综合指数，无量纲；

A_i ——指标体系中的各子指标去量纲后的结果，无量纲；

n ——指标总数，无量纲；

ω ——指标权重，无量纲。

子指标可选用下列的主观赋权法和客观赋权法确定：

- a) 常用的主观赋权法：
 - 1) 层次分析法；
 - 2) 专家调查法(德尔菲法)；
 - 3) 模糊分析法；
 - 4) 二项系数法；
 - 5) 环比评分法；
 - 6) 最小平方法；
 - 7) 序关系分析法。
- b) 常见的客观赋权法：
 - 1) 最大熵计数法；
 - 2) 主成分分析法；
 - 3) 多目标规划法；
 - 4) 均方差法；
 - 5) 变异系数法；
 - 6) 最大离差法；
 - 7) 简单关联函数法。

可将综合评价指数 Z 的计算结果划分为五个等级，表征自主船舶编队航行系统的整体RAMSI水平。具体等级划分说明见表3。

表3 RAMSI 评估等级说明

综合指数Z范围	等级	对应后果
[0.80, 1.00]	5级	自主船舶编队航行RAMSI表现极佳，无关键故障模式报告，所有子指标均在允许偏差范围内。编队航行安全性与协同效率达到最优水平，无需额外维护干预。
[0.60, 0.80)	4级	自主船舶编队RAMSI表现稳定，存在少量低风险故障模式，但未影响核心功能。需定期监控但无需立即修复。
[0.40, 0.60)	3级	自主船舶编队RAMSI表现中等，出现中等风险故障模式，可能导致编队协同效率下降。需制定预防性维护计划。
[0.20, 0.40)	2级	自主船舶编队RAMSI表现欠佳，高频次出现高风险故障模式，已影响航行安全。需立即进行针对性维修与系统优化。
[0.00, 0.20)	1级	自主船舶编队RAMSI表现严重偏离预期，存在极高风险故障模式，可能导致重大事故。必须停航整改。

10 提升措施制定

若子指标或综合指数评估未通过，可考虑从以下方面制定针对性提升措施，并在实施后重新执行验证评估流程：

- a) 技术优化与系统改进：针对硬件、软件、算法或架构的缺陷进行升级或重构。如增强冗余设计，优化算法逻辑等；
- b) 流程与制度完善：优化运维流程、测试规范及应急响应机制。如完善预防性维护计划，制定标准化维护流程等；
- c) 人员能力与协作强化：提升技术团队与操作人员的专业能力。如开展定期培训，引入AR/VR工具辅助维修与演练，建立跨部门协作机制等。

11 报告

所有子指标与综合指数均达标，且提升措施（如有）通过复验，则可申请评估机构出具RAMSI报告。出具报告后，整个RAMSI验证评估流程结束。

报告宜包含以下内容：

- a) 验证评估概述：如评估依据，评估范围，评估目的等；
- b) 验证方法与过程：如测试方法，数据来源等；
- c) 指标计算结果：各自指标与综合指标的要求值，实测值；
- d) RAMSI提升措施与执行情况：若存在验证评估未通过的情况，宜在报告中列出所制定RAMSI提升的具体措施及实施情况；
- e) 综合评估结论：如达标申明，优势分析和改进建议等。

附录 A（资料性）
自主船舶编队系统 RAMSI 典型参数

表A.1 可靠性参数

参数	符号	单位
编队可靠度	$R(t)$	无量纲
平均失效前时间	$MTTF$	小时
平均失效间隔时间	$MTBF$	小时
编队失效率	$\lambda(t)$	无量纲

表A.2 可用性参数

参数	符号	单位
编队瞬时可用度	$A(t)$	无量纲
编队运行可用度	A_0 或 $D(T)$	无量纲
编队可达可用度	A_α	无量纲
编队固有可用度	A_i	无量纲

表A.3 可维护性参数

参数	符号	单位
系统维修度	M	无量纲
系统维修率	$\mu(\tau)$	无量纲
平均维修时间	$MTTR$	小时

表A.4 安全性参数

参数	符号	单位
综合安全度	R	无量纲
瞬时安全度	S	无量纲
平均危险故障时间	$MTBF(H)$	小时

表A.5 互操作性参数

参数	符号	单位
船间数据交互成功率	S_1	无量纲
船岸数据交互成功率	S_2	无量纲
系统响应时间	AT	秒
兼容性测试通过率	PR	无量纲
数据一致性	DC	无量纲