

团 体 标 准

T/CHI XXX—202X

桥区水域船舶通航安全多维防撞核心技术 与关键装备规范

Specifications for multi-dimensional collision prevention core technologies and
key equipment for ship navigation safety in bridge area waters

(征求意见稿)

提交反馈意见时，请将您知道的专利连同支持性文件一并附上。

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国高技术产业发展促进会 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	3
5 船-桥防撞核心技术	4
5.1 桥区水域的划分	4
5.2 桥梁的通航净空宽度	4
5.3 多元感知过桥船舶	4
5.4 桥梁对过桥船舶操纵特性的影响	5
5.5 桥区水域船舶异常行为检测	6
5.6 船舶航迹带宽度计算模型	7
5.7 桥墩紊流宽度计算模型	7
5.8 船-桥碰撞概率计算模型	8
6 船-桥防撞主动预警系统	9
6.1 船-桥防撞主动预警系统的设计原理	9
6.2 船-桥防撞主动预警系统的建设方案	9
6.3 船-桥防撞主动预警系统的数据传输	10
6.4 船-桥防撞主动预警系统的预警信息	10
6.5 船-桥防撞主动预警系统的设备选型	11
6.6 船-桥防撞主动预警系统的安全性	11
6.7 船-桥防撞主动预警系统的性能指标	11
6.8 船-桥防撞主动预警系统的助航警示	11
6.9 船-桥防撞主动预警系统的用户界面	12
6.10 船-桥防撞主动预警系统的特点与优势	12
6.11 船-桥防撞主动预警系统的应用场景	12
7 船-桥防撞被动防撞装备	12
7.1 船-桥防撞被动防撞装备的设计原理	12
7.2 船-桥防撞被动防撞装备的防撞机制	13
7.3 船-桥防撞被动防撞装备的设计因素	13
7.4 船-桥防撞被动防撞装备的结构类型	13
7.5 船-桥防撞被动防撞装备的防撞等级	14
7.6 船-桥防撞被动防撞装备的使用年限	14
7.7 船-桥防撞被动防撞装备的材料力学性能	14
7.8 船-桥防撞被动防撞装备的性能指标	14
7.9 船-桥防撞被动防撞装备的建设原则	14
7.10 船-桥防撞被动防撞装备的建造工艺	14
附录 A (资料性) 通航孔单向通航净宽计算方法	16
附录 B (资料性) 通航孔双向通航净宽计算方法	17
附录 C (资料性) 紊流影响的通航净空宽度增加值计算方法	18

前 言

本标准按照 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这些专利的责任。

本文件由武汉理工大学提出。

本文件由中国高技术产业发展促进会归口。

本文件起草单位：武汉理工大学、武汉理工大学三亚科教创新园、桥守科技（海南）有限公司、长江航务管理局、重庆交通大学、武汉欣海远航科技研发有限公司。

本文件主要起草人：

桥区水域船舶通航安全多维防撞核心技术与关键装备规范

1 范围

本文件规定了桥区水域船-桥防撞核心理论、预警技术、防护装置等方面的技术要求。

本文件适用于桥梁跨越的内河航道、沿海水域场景，涵盖桥梁监测与预警系统在多维感知、智能预警、关键装备选型等方面的技术要求，也适用于涉水桥梁安全防撞的规划、研发、测试验收及运营管理。

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，凡是注日期的引用文件，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 4099-2005 航海常用术语及其代（符）号
- GB/T 11412.1-2009 海船安全开航技术要求 第1部分：一般要求
- GB/T 19945-2005 水上安全监督常用术语
- GB/T 37373-2019 智能交通 数据安全服务
- GB/T 37378-2019 交通运输 信息安全规范
- GB/T 20068-2017 船载自动识别系统（AIS）技术要求
- GB/T 33674-2017 气象数据集核心元数据
- GB/T 38672-2020 信息技术—大数据—接口基本要求
- GB/T 28181-2022 公共安全视频监控联网系统信息传输、交换、控制技术要求
- GB/T 42135-2022 智能制造 多模态数据融合技术要求
- GB50348-2018 安全防范工程技术标准
- GB 24418-2020 中国海区可航行水域桥梁助航标志
- JT 376-1998 内河通航水域桥梁警示标志
- JTS 180-4-2020 长江干线通航标准
- JTS 165-2013 海港总体设计规范
- JTS 120-1-2018 跨越和穿越航道工程航道通航条件影响评价报告编制规定
- JT/T 1414-2022 公路桥梁防船撞装置通用技术条件
- SL/T 191-1996 水工混凝土结构设计规范
- SL 385 2007 水文数据 GIS 分类编码标准
- T/TMAC 099-2024 桥梁防船撞智能预警系统设计规范

3 术语和定义

3.1

航向 course

船舶航行的方向，从基准北顺时针方向计量到船首线的角度，代号：C。

3.2

船速 ship speed

船舶在无风、无流影响下单位时间内航行的距离，代号：V。

3.3

距离 distance

为两点间的连线长度，代号：D。

3.4

船舶吃水 ship's draft

船舶在正浮状态时,船体浸入水中的深度。

3.5

风压差 leeway angle

真航行与风中航迹向之差，代号： α 。

3.6

流压差 drift angle

真航向与流中航迹向之差，代号： β 。

3.7

能见度 visibility

视力正常的人在当时条件下能见到的水面 1/2 以上视野范围内的最大水平距离。

3.8

超高 over-high

船舶装载超过规定的高度或船舶水面以上高度超过过河建筑物净空高度。

3.9

船舶超载 overload

因船上货物、燃料、淡水、物料的实际总载重量，超过船舶根据有关载重线规定勘画的相应的载重线，使得船舶无足够的干舷，而处于不适航状态。

3.10

富裕水深 under keel clearance

船舶正浮时，船底龙骨至海底(或河床)表面的垂直距离，又称富余水深。

3.11

水位 stage

自由水面相对于某一基面的高程。

3.12

流速 flow velocity

水的质点在单位时间内沿流程移动的距离。

3.13

流量 discharge

单位时间内通过河渠或管道某一过水断面的水体体积。

3.14

水文监测 hydrometry

从站网布设到收集和整理水文资料的全部技术过程。

3.15

水文资料 hydrologic data

各种水文要素的测量、调查、记录及其整理分析成果的总称。

3.16

通航桥梁安全管理水域 water areas exercising safety control of traffic near bridge

桥梁通航安全管理法规规定的在桥轴线上、下游一定范围内实施通航安全管理的水域。

3.17

桥梁通航尺度 limits for ship's passage under bridge

限定船舶通过桥梁通航桥孔的最大尺度，包括船舶长度、宽度及水面以上高度。

3.18

桥梁助航标志 aids to navigation on bridges

为保障桥梁和船舶航行安全，具有示位、警告危险和指示交通等功能，设置于桥梁上的视觉航标、音响航标、无线电航标。

3.19

通航桥孔最佳通过点 best point of passage

船舶通过桥梁通航桥孔时的最佳位置。

4 缩略语

下列缩略语适用于本标准。

AIS：自动识别系统（Automatic Identification System）

VHF: 甚高频 (Very High Frequency)
 XML: 可扩展标记语言 (Extensible Markup Language)
 JSON: 轻量级的数据交换格式 (JavaScript Object Notation)
 BDS: 北斗导航系统 (Beidou Navigation Satellite System)
 GPS: 全球定位系统 (Global Positioning System)
 CPA: 最近会遇点 (Closest Point of Approach)
 TCPA: 最近会遇时间 (Time of Closest Point of Approach)
 AI: 人工智能 (Artificial intelligence)
 PIV: 粒子图像测速 (Particle Image Velocimetry)
 ADV: 声学多普勒流速仪 (Acoustic Doppler Velocimeter)
 CCS: 中国船级社 (China Classification Society)

5 船-桥防撞核心技术

5.1 桥区水域的划分

将桥区水域划分为船-桥干扰区、禁入区、监控区和警戒区。划分依据如下:

- a) 船-桥干扰区: 紧邻桥墩和桥位水域, 船舶极易受到桥墩紊流、桥孔形态影响, 且一旦失控, 碰撞概率高。
- b) 禁入区: 基于最不利的安全裕度而划定, 一旦船舶进入极有可能与桥墩或附属结构接触, 因此严禁常规通航。
- c) 监控区: 船舶经此区时, 应加强航速与航向控制的实时监测, 以尽早发现和预防可能的风险情况。
- d) 警戒区: 对普通航行影响相对较小, 但仍需在航行指引系统中设置预警提示, 以提醒船舶注意过桥安全。

5.2 桥梁的通航净空宽度

桥梁的通航净空宽度应符合下列规定。

- a) 通航孔单向通航的净宽计算方法参见附录 A。
- b) 通航孔双向通航的净宽计算方法参见附录 B。
- c) 当桥梁墩柱附近出现碍航紊流时, 其通航净空宽度增加值计算方法参见附录 C。

5.3 多元感知过桥船舶

5.3.1 数据采集

支持多维感知设备数据类型, 包括但不限于:

- a) 可见光/红外视频图像。在桥墩上方布设光电设备, 结合可见光和红外谱段提供高分辨率船舶图像捕捉。双光谱红外热成像摄像机利用热辐射差异识别船舶, 即使在夜间和恶劣天气下也能有效探测船舶轮廓和运动轨迹, 识别准确率达 95%以上。
- b) 雷达数据。在桥墩上方部署激光雷达, 获取船舶的精确方位 (方位角误差 $<1^\circ$)、距离 (精度 $<0.1\text{m}$) 和速度 (分辨率 $<0.1\text{m/s}$), 实现对过桥船舶的高精度动态跟踪。
- c) AIS 数据。在桥墩上方架设 AIS 接收机, 接收和处理 VHF 频段的船舶信号, 解析出船舶位置、

航向、航速和航行状态等信息。AIS 接收机部署应确保信号覆盖全桥区水域，灵敏度应满足 GB/T 20068-2017 要求

d) 气象、水文数据。对桥区水域气象、水文数据进行小时级自动采集，主要包含风向、风速、流速、流向、水位等数据，数据精度应满足 GB/T 33674-2017 和 SL 385-2007 要求

5.3.2 数据格式

数据编码格式应采用国际通用的标准格式，如 XML、JSON 等，并符合 GB/T 38672-2020 的要求。

5.3.3 数据传输

数据传输应满足要求：

- a) 可见光/红外视频图像数据传输应符合 GB/T 28181-2022 的相关要求。
- b) 雷达数据和 AIS 数据宜确保数据传输的实时性和稳定性。
- c) 气象数据和水文数据宜确保数据传输的持续性和完整性。

5.3.4 数据存储

数据存储应满足要求：

- a) 视频图像存储应不少于 30 天。
- b) 雷达和 AIS 数据存储应不少于 90 天。
- c) 气象数据和水文数据存储时间应不少于 360 天。
- d) 应采用冗余存储和分布式存储技术，提高数据的可靠性和可用性，防止数据丢失或损坏。

5.3.5 数据融合

数据融合应满足要求：

a) 在图像（视觉特征）、雷达（航向/航速）和 AIS（位置/船名）数据之间建立语义关系，确保每种数据的表示在公共空间内对齐。

b) 通过统一表示空间把不同数据优势结合起来，融合后，可互补各种数据弱点（如图像在雾天失效时依赖雷达），将过桥船舶的识别准确率从单一模态的 75% 提升至 90% 以上。数据融合技术应满足 GB/T 42135-2022 要求。

5.3.6 数据分析

数据分析应满足要求：

a) 船舶轨迹预测。基于历史航迹数据，使用时间序列模型分析船舶速度和航向变化，预测未来船舶过桥轨迹。结合通航孔位置，判断船桥碰撞风险，并生成预警信号。

b) 船舶异常转向行为检测。利用三次样条插值和卡尔曼滤波算法对轨迹数据进行插值和去噪，然后从处理后的 AIS 轨迹数据中提取船舶加速度、转向率的阈值，利用该阈值构建船舶异常行为识别模型，实现对过桥船舶异常变速和异常转向行为检测。

c) 过桥风险智能预警。采用边缘计算技术，在岸端完成数据处理，通过 AI 算法分析船舶轨迹，判断是否存在偏航、超高或超速等过桥危险行为，并进行分级、分层预警。

5.4 桥梁对过桥船舶操纵特性的影响

5.4.1 船舶过桥操纵特性数据库

数值模拟各代表船型在不同流速、流向过桥时横向力增加值和水流阻力的变化值，建立船舶过桥操纵特性数据库。

5.4.2 船舶数值模拟

船舶数值模拟分为以下步骤：

- a) 使用三维建模软件创建桥梁和船舶的数值结构模型，包括桥墩形状、船舶船型和水域几何。
- b) 采用有限体积法离散化计算域，对于规则区域采用结构化网格，复杂结构采用非结构化网格，最大程度保证网格的正交性和光滑性，并在船舶附近加密网格以捕捉边界层效应。
- c) 指定入口边界的来流速度，出口边界确定为压力出口，桥梁和船舶表面设为无滑移壁面，湍流模型选用 $k-\varepsilon$ 或 $k-\omega$ 模型。
- d) 确定数值计算的时间步长，选择耦合求解器处理压力-速度耦合，采用瞬态模拟，捕捉船舶动态操纵过程。
- e) 提取流场速度、压力分布和船舶力矩数据，数值分析桥墩引起的水流加速导致船舶横向力的增加值和水流阻力的变化值。

5.4.3 矢量运算

矢量运算分为以下步骤：

- a) 利用测流计采集桥区水流流速、流向数据。
- b) 针对有 AIS 信号船舶，采用 AIS 自动收取过桥船舶的航向、航速信息，与桥区的测流计数据进行矢量运算，得到过桥时船舶对水的流速、流向。
- c) 针对无 AIS 信号船舶，采用激光雷达探测过桥船舶的航向、航速信息，与桥区的测流计数据进行矢量运算，得到过桥时船舶对水的流速、流向。

5.4.4 差值计算

综合监测的过桥船舶特征、实时水流数据，在船舶过桥操纵特性数据库采用差值法，求解过桥船舶横向力的增加值和水流阻力的变化值。

5.5 桥区水域船舶异常行为检测

5.5.1 数据处理

对 AIS、雷达等数值型字段，缺失数据采用均值或中位数填充，并进行归一化处理。

5.5.2 创建图像数据库

创建涵盖多种天气与桥区环境的标准视频图像数据库，为模型训练与评价提供广泛场景数据支撑。

5.5.3 搭建神经网络

采用卷积神经网络，提高在雾霾等低可视度环境下的图像清晰度。

5.5.4 视觉感知增强

使用局部生成对抗网络，对夜间或暗光环境下的图像进行视觉感知增强。

5.5.5 船舶异常行为检测

构建用于船舶运动监测与异常检测的深度学习网络模型，实现了对不同环境下船舶目标的精准识别和异常事件的自动检测。

5.6 船舶航迹带宽度计算模型

5.6.1 代表船型

统计桥区水域船舶交通流，分析过桥船舶的主要类型、尺寸，确定代表船型。

5.6.2 代表船型过桥航迹带宽度数据库

计算各代表船型在不同风速、风向、流速、流向下的航迹带宽度，建立代表船型过桥航迹带宽度数据库：

a) 利用船舶受流载荷，分析船舶流致漂移运动，计算船舶流致漂移带宽度，计算公式符合 JTS 165-2013 的要求。

b) 利用测船舶受风载荷，分析船舶风致漂移运动，计算船舶风致漂移带宽度，计算公式符合 JTS 165-2013 的要求。

c) 船舶流致漂移带宽度加上船舶风致漂移带宽度，得出不同条件下的船舶航迹带宽度。

5.6.3 气象/水文数据

利用测风仪、测流计等传感器采集桥区水域气象、水文数据。

5.6.4 有 AIS 信号船舶

采用 AIS 自动收取过桥船舶的航向、航速信息，与桥区的流速计、测风仪数据进行矢量运算，得到船舶过桥时的受风、受流情况。

5.6.5 无 AIS 信号船舶

采用激光雷达探测过桥船舶的航向、航速信息，与桥区的流速计、测风仪数据进行矢量运算，得到船舶过桥时的受风、受流情况。

5.6.6 差值计算

综合船舶特征（船型、尺寸）、气象条件（风、流），在代表船型过桥航迹带宽度数据库采用差值法，求解过桥船舶的航迹带宽度。

5.7 桥墩紊流宽度计算模型

5.7.1 桥区流场测量

采用 PIV、ADV 等测试手段，测量桥区流场的速度分布、湍动强度及涡量。

5.7.2 桥墩局部冲刷实验

结合动床试验的河床演变测量，对桥墩周边实际水力特性与泥沙输移规律建立更全面的认知，为紊流宽度计算模型提供试验依据。

5.7.3 桥墩紊流范围

采用定床和动床试验方法，分析包括进壁流层、过渡层、紊流核心区在内的桥墩紊流范围。

5.7.4 桥墩紊流宽度的影响因素

确定改变桥墩紊流宽度的影响因素，包括流速、桥墩尺度、墩型、航道条件及分流比等。

a) 测量桥区水域流速，流速是影响桥区紊流范围和涡旋强度的关键参数，流速越大，紊流核心区及尾迹区通常越宽。

b) 确定桥墩尺寸，不同尺度的桥墩对来流的阻碍特性差异明显。

c) 确定航道条件，航道的宽窄、深浅、横断面形态、糙率及边岸曲率均会对紊流宽度产生耦合影响。

d) 测量河流分流比，对于分汊河道，分流比决定了多汊河道中各河道的来流速度分配，影响每个桥墩下游的紊流发展程度。

5.7.5 桥墩紊流宽度计算

桥墩紊流宽度的计算主要包括：

a) 针对顺直河段纵向流速分布相对均匀、横向水力梯度相对较小的航道特点，依据流速、桥墩尺度、水深参数建立顺直河段的桥墩紊流宽度计算模型。

b) 针对弯曲河段受曲率影响显著，流速在凸岸、凹岸分布不均匀的特点，在桥墩紊流宽度计算模型中引入弯道曲率半径、弯道宽深比参数，对紊流宽度计算进行修正。

c) 针对分流口河段分流处存在流量突变，水流在分流口附近紊动增强、流场复杂等特点，在桥墩紊流宽度计算模型中引入分流比、分流口几何尺寸参数，对紊流宽度计算进行修正。

d) 针对汇流口河段汇流口水流紊动增强，易产生回流区或强涡流，局部紊流范围可能扩大的特点，在桥墩紊流宽度计算模型中引入分流交汇角度与水位差参数，对紊流宽度计算进行修正。

5.8 船-桥碰撞概率计算模型

5.8.1 确定关键风险区域

综合考虑流速、桥梁墩柱位置、航道宽度、航线分布、碰撞事故频次等因素，确定关键风险区域，确定方法如下：

a) 收集近年在桥区发生的碰撞和搁浅等事故案例数据，对事故发生的时间、船舶类型、碰撞原因、桥梁结构受损程度等信息进行综合分析。

b) 对事故发生位置的空间分布与船舶交通流等因子进行关联分析，得出高风险区域或时段。

c) 使用 AIS 手段，记录船舶的船名、船型、航速、航迹等信息，为划定区域边界提供精细化支撑。

d) 在桥区关键断面设置监测站或在线观测系统，对来往船舶数量与河道水力条件进行实时记录，辅助验证警戒区、监控区等划分的合理性。

5.8.2 船-桥碰撞概率模型

考虑桥区船舶交通流特征、船舶事故特征、船舶行为特征、航路航法、环境条件、桥梁特征等因素，建立船-桥碰撞概率计算模型：

$$P_T = N \times P_{Oc} \times P_{Occ} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

P_T -年碰撞概率；

N -桥区船舶年通过量；

P_{Oc} -过桥船舶的失控概率；

P_{Occ} -失控船舶与桥梁发生碰撞的概率

5.8.3 关键参数

模型中关键参数的确定方法如下：

a) N 的确定方法：由桥梁管理部门统计的船舶年通行量直接取得；对于季节性明显的航道需考虑季节流量差异。

b) P_{Oc} 、 P_{Occ} 的确定方法：针对失控事件与碰撞事件，运用泊松分布、二项分布概率模型进行拟合。

6 船-桥防撞主动预警系统

6.1 船-桥防撞主动预警系统的设计原理

以“预防”为核心，在船-桥碰撞事故发生前构建“多维度监测+智能算法研判”的技术体系。在监测层面，以视频监控、激光雷达、AIS形成“多重感知网”；智能算法的深度应用，更让船-桥碰撞事故隐患识别从“被动发现”转向“主动预判”，形成“监测-预判-预警-通知”的完整链路。通过在船舶与桥梁发生碰撞之前，实时探测、识别潜在的危险船舶，并提前向船方和桥方发出警报，从而争取到宝贵的时间来采取避让措施，避免碰撞事故发生。

6.2 船-桥防撞主动预警系统的建设方案

6.2.1 船-桥防撞主动预警系统架构设计

构建桥梁主动防撞预警系统架构，主要包括：

a) 感知层：由AIS、雷达、视频、光电、水文、气象等多种数据源构成的感知网络；

b) 传输层：包括有线与无线通信方式，通过专用网络或公网将感知数据传递至数据中心；

c) 数据处理层：部署大数据存储、分布式计算与深度学习推理框架，实现实时数据清洗、融合、风险分析与预测；

d) 应用层：包括综合监控界面、风险报警界面和联动指挥平台，为桥梁、航道、船舶管理人员提供实时预警、应急决策支持。

6.2.2 船-桥防撞主动预警系统功能模块

构建桥梁主动防撞预警功能模块，主要包括：

a) 可视化监控：采用高清影像和智能识别技术，为管理人员提供直观、实时的桥区水域动态画面。

b) 船舶超高预警：以图像识别或激光对射的方式监测船舶水面高度。触发预警条件：船舶水面高度大于桥梁净空高度-安全裕度（默认 0.5 米）。预警性能指标：超高预警准确率大于 90%，漏报率小于 5%。

c) 船舶偏航预警：雷达实时监测过桥船舶的航向、位置。触发预警条件：船舶航向与桥梁主轴法线夹角大于 10° 或船舶与通航航道中轴线距离大于 0.4 倍通航孔宽度。预警性能指标：偏航检测精度小于 1 米，误报率小于 5%。

d) 远距离告警：对超高、偏航等可能导致船桥碰撞的风险行为，通过远程告警装置进行警示。

e) 语音实时播报：在发现异常时自动语音提示船舶驾驶人员及指挥中心，提升反应速度。

f) 信息多级推送：将预警信息同步传递给桥梁管理部门、海事监管部门以及涉航单位，以便协同应对。

g) 日志记录：所有触发的预警事件自动存档，支持事后分析。

h) 事后取证：监控区域满足全天及恶劣天气下依然可进行拍照取证，系统数据可为事故原因分析、责任认定提供事实依据。

6.2.3 船-桥防撞主动预警系统工作流程

船-桥防撞主动预警系统工作流程主要包括：

a) 目标探测与跟踪：雷达和 AIS 持续扫描监控区域，发现并跟踪所有船舶。

b) 数据融合与身份关联：将雷达轨迹与 AIS 信息进行匹配，确认每艘过桥船舶的“身份”。

c) 轨迹预测与风险评估：系统基于船舶当前运动状态，预测其未来短时间内的航行轨迹，并计算其与桥梁各部位的 CPA/TCPA。

d) 预警等级判定

正常（绿色）：船舶航迹安全，无风险。

提醒（蓝色）：船舶进入监控区，需保持关注。

警告（黄色）：船舶航向/航速异常，存在潜在风险，需注意。

严重警告（红色）：船舶存在极高的碰撞风险，立即触发警报。

e) 多模式预警发布：根据预警等级，系统自动或由管理人员确认后，通过上述渠道向船方和桥方发布预警信息。

f) 联动与处置：桥方监控中心接到警报后，可立即通过 VHF 与船方沟通，必要时启动应急预案，联系海事部门进行干预。

6.3 船-桥防撞主动预警系统的数据传输

船-桥防撞主动预警系统的数据传输应遵循如下原则：

a) 主动预警系统的数据传输应符合 GB50348-2018 规范要求。

b) 主动预警系统设备到管理平台的数据传输可采用公用通信网或专用通信网。

c) 主动预警系统的数据传输可采用以太网、光传输网络、窄带物联网或其他物联网技术。

d) 对主动预警系统有安全保密要求的传输方式应采取信号加密措施。

e) 主动预警系统的数据宜采用有线传输为主，对布线困难的场所，可选用无线传输模式。

6.4 船-桥防撞主动预警系统的预警信息

船-桥防撞主动预警系统的预警信息设置应遵循如下原则：

a) 主动预警系统应及时将预警信息通过有效途径进行发布。

b) 主动预警系统预警信息包括声、光、无线通讯、甚高频通讯等方式。

- c) 主动预警系统预警信息应和现场环境相协调，且不与桥区的助航标等设备相互干涉。
- d) 主动预警系统应设置 AIS、VHF 发射机，与进入桥区的船舶保持实时通讯的功能。
- e) 主动预警系统应根据现场条件，设置预警电笛、警示灯、LED 显示屏、桥廓灯等装备。
- f) 主动预警系统 VHF 发射机的发射频道应按照当地海事规定的频道执行，发射功率可根据现场适用条件调节。

6.5 船-桥防撞主动预警系统的设备选型

主动预警系统的设备宜选用工业级元件制造，其选型要求应满足 T/TMAC 099-2024 规定。

6.6 船-桥防撞主动预警系统的安全性

船-桥防撞主动预警系统的安全性应遵循如下原则：

- a) 主动预警系统的安全性应符合 GB50348-2018 的相关规定。
- b) 主动预警系统的设备结构应具备足够的强度、刚度和稳定性，且确保连接牢固。
- c) 主动预警系统应有防病毒和防网络入侵的措施。
- d) 主动预警系统的关键数据信息应建设备份机制。
- e) 主动预警系统断电中断，恢复供电后，不需设置应能恢复到原有的工作状态。
- f) 主动预警系统，其设备、材料应做防晒、防淋、防冻、防尘、防浸泡、防腐蚀等设计。
- g) 海域桥梁部署的主动预警系统，其设备、材料还应具备耐盐雾腐蚀的性能。

6.7 船-桥防撞主动预警系统的性能指标

主动预警系统监测区域应能全天候覆盖桥区水域，其性能指标满足 T/TMAC 099-2024 要求。

6.8 船-桥防撞主动预警系统的助航警示

6.8.1 桥区应设置助航标志、航标维护设施、安全管理设施和监控设施设备。

6.8.2 助航标志包括通航桥孔最佳通过点标志、通航桥孔左侧标志、通航桥孔右侧标志、桥孔禁航标志和桥墩警示标志，助航标志的设置应符合 GB 24418-2020 要求。

6.8.3 最佳通过点标志应设置在桥梁通航孔航道轴线上，并综合考虑以下所有的相关因素之后确定：

- a) 桥梁净空高度、净空宽度、航道宽度；
- b) 通航桥孔水深，特别是在水深分布不规则的地方；
- c) 桥墩和其他设施；
- d) 通航孔是单向通航还是双向通航。

6.8.4 双向通航桥孔应在桥梁上下游两侧设置最佳通过点标志、通航桥孔左侧标志、右侧标志和桥墩警示标志；单向通航桥孔应在桥孔允许船舶驶入侧设置最佳通过点标志、通航桥孔左侧标志、右侧标志和桥墩警示标志，在禁止船舶驶入侧设置桥孔禁航标志和桥墩警示标志。

6.8.5 当通航桥孔桥墩设有泛光照明，且可以显示桥墩或桥墩的防撞设施时，可不设桥墩警示标志。

6.8.6 当通航桥孔跨度较小或桥间均为可通航水域时，且已经设置泛光照明或桥墩警示标志的，可不设通航桥孔左侧标志、右侧标志。

6.8.7 桥梁助航标志的安装不应影响桥孔的通航净空。

6.8.8 通航 5000 吨级及以上船舶的通航孔，其夜间航标灯光射程应不小于 3nmile，其他通航孔的夜间航标灯光射程应不小于 2nmile。通航桥孔日标尺寸应符合 GB 24418-2020 的要求。

6.8.9 对于有多个通航桥孔的桥梁，相邻或区位相近可能造成相互影响的通航孔的灯质灯光节奏和周期应有所区别，同一通航桥孔的左侧标志、右侧标志应采用相同的灯光节奏和周期，宜同步闪。

6.8.10 对夜间灯光影响桥面交通的，应采取措施进行遮蔽。

6.8.11 桥梁上可安装一座或多座雾号警示航行船舶，在同一桥梁上的不同位置安装雾号时，其音响信号特征应相互区别。

6.9 船-桥防撞主动预警系统的用户界面

6.9.1 登录系统：输入用户名、密码登录系统；用户登录系统时记录登录信息。

6.9.2 信息列表：循环显示桥梁水域风速、能见度、水位等信息。

6.9.3 预警信息实时提示界面：预警信息的实时提示，如果有新的预警信息，发出声音、图标及文字提醒。

6.9.4 地图浏览：可在地理图、百度地图、电子海图三种显示方式进行切换浏览。

6.9.5 事件列表浏览：系统对预警事件进行记录，记录事件时间、船舶 MMSI、事件类型，以文字列表的形式供用户浏览。

6.9.6 视频监控：实时监控浏览、回放；可根据时间查看、回放监控信息。

6.9.7 预警管理：根据时间、地点、船名、预警类型管理预警信息，主要包括：超高预警信息管理、偏航预警信息管理、失控预警信息管理。

6.9.8 数据统计：统计通航信息、报警信息、监测数据等，并可根据时间、地点、船名、预警类型查看、下载相关数据，统计数据不可删除。

6.9.9 硬件管理：系统中主要的硬件设备记录在数据库中，并且实时更新数据库中的设备状态，用户可以实时查看设备功能状态。

6.9.10 远程管理：可以远程对现场的设备调试、测试；查看设备运行状态，并可远程启动预警功能。

6.9.11 系统设置：包括账户管理、电子围栏设置、设备报警时间长度、虚拟航标设置、远程语音设置等功能。

6.10 船-桥防撞主动预警系统的特点与优势

6.10.1 主动性：防患于未然，将船-桥碰撞事故遏制在发生之前。

6.10.2 实时性：7x24 小时不间断监控，响应速度快。

6.10.3 智能化：基于 AI 和大数据分析，能够智能识别过桥船舶超高、偏航、失控等危险行为。

6.10.4 可视化：为桥梁、航道、船舶管理人员提供直观的全局态势感知。

6.10.5 多手段联动：综合运用多种预警方式，确保预警信息有效传达。

6.11 船-桥防撞主动预警系统的应用场景

船-桥防撞主动预警系统主要应用于下述场景：

- a) 通航孔狭窄的大型跨海、跨江大桥。
- b) 桥区水文条件复杂、水流湍急的桥梁。
- c) 受雾、雨、雪等恶劣天气影响频繁的桥梁。
- d) 位于繁忙港口、航道交汇处的桥梁。

7 船-桥防撞被动防撞装备

7.1 船-桥防撞被动防撞装备的设计原理

以“防护”为核心，在船-桥碰撞事故发生时构建“多维度防护+智能响应机制”的被动装备体系。

在防护层面，以能量吸收材料和弹塑变形结构形成“多重防护网”；智能响应机制的深度应用，更让船-桥碰撞损伤控制从“被动承受”转向“主动耗散”，形成“碰撞-吸收-分散-止损”的完整链路。通过在船舶与桥梁碰撞瞬间，防护装备吸收并分散撞击能量，从而最大限度降低桥梁损伤和船舶破坏，实现高效、低成本的被动安全防护。

7.2 船-桥防撞被动防撞装备的防撞机制

被动防撞装备主要通过能量吸收和缓冲原理工作，包括：

- a) 弹性缓冲：防撞套箱或浮式装置的内部填充橡胶或泡沫材料层，利用材料的弹性变形吸收船舶碰撞能量，从而减少冲击力的峰值。材料弹性形变吸收的碰撞力基于 JT/T 1414-2022 规定计算。
- b) 塑性变形：金属防撞结构超过屈服强度后发生永久变形，通过不可逆变形（如弯曲、压溃）耗散能量，将船舶撞击动能转化为内能和热能，类似于汽车保险杠的“牺牲”设计。防撞材料的屈服强度应满足 SL/T 191-1996 规定。
- c) 摩擦阻尼：船舶碰撞时，接触面产生摩擦阻力，降低船速，并将船舶动能转化为热能和摩擦功。

7.3 船-桥防撞被动防撞装备的设计因素

被动防撞装备的设计因素应综合考虑桥墩自身的抗撞能力、桥墩位置、桥墩外形、水流速度与流向、水位变化、代表船型、碰撞角度及速度等因素。

7.4 船-桥防撞被动防撞装备的结构类型

船-桥被动防撞装备主要有防撞套箱、防撞岛、防撞墩、防撞桩、柔性拦截索等结构类型，这些类型符合 JT/T 1414-2022 对被动防护结构的分类要求。

a) 防撞套箱：防撞套箱是一种包裹在桥墩外部的箱形防护结构，通常呈环形或矩形，类似于一个“套子”，用于直接吸收船舶碰撞冲击。

- 适用于水位波动大、船舶通航密度大的河流桥梁。
- 优点：安装简便、成本较低、防护效果好，能承受中小型船舶碰撞。
- 缺点：占用空间较大，可能影响航道宽度。

b) 防撞岛：防撞岛是一种人工岛状结构，围绕桥墩建造的防护岛体，通常由堆石或混凝土形成。船舶撞击岛体时，利用岛体的体积和坡面引导船舶偏转，同时通过摩擦和变形吸收能量。

- 适用于浅水区或河道宽阔的桥梁。
- 优点：防护范围广，能抵御大型船舶撞击。
- 缺点：占用河道面积大，影响水流；建设周期长，成本高

c) 防撞墩：防撞墩是独立于主桥墩的辅助结构，通常安装在桥墩上游，作为第一道防线，当船舶撞击防撞墩后减速或偏转，避免直接撞击主桥墩。

- 适合开阔水域或跨海桥梁，通常针对大型船舶。
- 优点：独立防护，不影响主桥结构；耐久性强，可重复使用。
- 缺点：建设成本高，需要河床基础稳固；可能成为航道障碍

d) 防撞桩：防撞桩是一组安装在桥墩上游的桩状结构，形成桩群屏障，船舶撞击时桩体通过弯曲变形或断裂吸收能量，桩群分散力道，防止船舶直达桥墩。

- 适合狭窄航道或中小型桥梁，主要针对小型船舶。
- 优点：灵活布置，易于维修更换；成本适中。
- 缺点：对大型船舶防护有限；桩体可能被冲刷，需要定期加固。

e) 柔性拦截索：柔性拦截索是一种张拉在桥墩上游的缆索系统，常为钢缆或纤维绳。船舶接触缆索时，利用缆索的弹性和张力吸收船舶动能。

- 适用于临时防护或水流湍急的河段，针对小型船只。
- 优点：安装快速、成本低、不占用永久空间；可调节张力。
- 缺点：对高速大型船舶效果有限；易受风浪影响，需要频繁检查。

f) 大水位变幅的自浮式防撞装置：大水位变幅的自浮式防撞装置是一种能自动随水位升降的浮动防护结构，专为水位变化幅度大的区域设计，通过浮筒调整高度以适应洪水或潮汐变化，装置始终保持在水面位置，避免固定装置因淹没失效。

- 适用于季节性洪水频繁或潮差大的河流桥梁。
- 优点：高度适应水位变化，防护连续性强；安装灵活，不需频繁调整。
- 缺点：维护成本较高，需要检查浮力系统。

g) 变截面桥墩的浮式防撞装置：变截面桥墩的浮式防撞装置是一种专为桥墩截面不规则（例如梯形或多边形）的浮动防护系统，利用浮力和可调节结构紧贴变截面桥墩，船舶碰撞时通过柔性缓冲层吸收冲击，同时浮动设计确保在水位变化时始终覆盖易撞部位。

- 适合桥墩形状复杂、变截面的现代桥梁。
- 优点：高度定制化，防护贴合度好；结合浮动功能，提升对变截面结构的保护。
- 缺点：设计和制造成本高；安装需精密测量。

7.5 船-桥防撞被动防撞装备的防撞等级

被动防撞装备的防撞等级分为 10 级，即 1000kN、2000kN、3000kN、5000kN、8000kN、10000kN、20000kN、30000kN、50000kN、100000kN。

7.6 船-桥防撞被动防撞装备的使用年限

在正常设计、生产、安装、运营和养护条件下，被动防撞装备的设计使用年限不应低于 15 年。

7.7 船-桥防撞被动防撞装备的材料力学性能

被动防撞装备的材料力学性能检测应符合 JT/T 1414-2022 的要求。

7.8 船-桥防撞被动防撞装备的性能指标

被动防撞装备的组成元件、构件及整体的性能指标应符合 JT/T 1414-2022 的要求。

7.9 船-桥防撞被动防撞装备的建设原则

- a) 被动防撞装备应具备吸收船舶碰撞能量，保护桥梁主结构的特性。
- b) 被动防撞装备的建设应考虑节省建造和维修成本。
- c) 被动防撞装备应确保材料耐久性强、维护简单。材料耐久性标准应满足 SL/T 191-1996 要求。

7.10 船-桥防撞被动防撞装备的建造工艺

船-桥防撞被动防撞装备的建造工艺要求如下：

a) 被动防撞装备应在工厂制造完成，成型、连接、焊接、涂装等制造工艺应符合 CCS《钢质海船入级规范》的规定。

b) 被动防撞装备可分块运输至现场，在现场按图纸要求拼接安装，整体的校正固定应符合设计图要求。

c) 构件安装时，不同侧结构构件宜对准安装，普通构件安装误差应不大于 4.0mm；重要构件安装误差应不大于 2.0mm。

附录 A

(资料性)

通航孔单向通航净宽计算方法

A.1 桥梁轴线法线方向与水流流向的交角不大于 5° 时，通航净宽可按下列公式计算：

$$B_{m1} = B_F + \Delta B_m + P_d \dots \dots \dots (2)$$

$$B_F = B_s + L \sin \beta \dots \dots \dots (3)$$

式中：

B_{m1} -单孔单向通航净宽(m)；

B_F -船舶航迹带宽度(m)；

ΔB_m -船舶与两侧桥墩间的富裕宽度(m)，取 0.6 倍航迹带宽度；

P_d -下行船舶偏航距(m)。横向流速小于 0.1m/s 时，取值 10；横向流速大于 0.3m/s 时，取值 30；其余取值 20；

B_s -船舶宽度(m)；

L -船舶长度(m)；

β -船舶航行偏航角($^\circ$)，取 6° 。

A.2 桥梁轴线法线方向与水流流向的交角大于 5° 时，通航净宽应加大，其增加值应符合表 1 的规定。

表 1 各级横向流速下通航净宽增加值

航道等级	通航净宽增加值 (m)				
	横向流速 0.4m/s	横向流速 0.5m/s	横向流速 0.6m/s	横向流速 0.7m/s	横向流速 0.8m/s
I	25	45	65	90	115
II	20	35	50	65	80
III	20	30	40	55	70

注：当横向流速为表中范围内某一值时，通航净宽增加值可采用内插法确定。

附录 B

(资料性)

通航孔双向通航净宽计算方法

B.1 桥梁轴线法线方向与水流流向的交角不大于 5° 时，通航净宽可按下列公式计算：

$$B_{m2} = 2B_F + b + \Delta B_m + P_d + P_u \dots \dots \dots (4)$$

$$B_F = B_s + L \sin \beta \dots \dots \dots (5)$$

式中：

B_{m2} - 单孔双向通航净宽(m)；

B_F - 船舶航迹带宽度(m)；

b - 上下行船舶会船时安全距离(m)，可取船舶宽度；

ΔB_m - 船舶与两侧桥墩间的富裕宽度(m)，取 0.6 倍航迹带宽度；

P_d - 下行船舶偏航距(m)。横向流速小于 0.1m/s 时，取值 10；横向流速大于 0.3m/s 时，取值 30；其余取值 20；

P_u - 上行船舶或船队偏航距(m)，可取 0.85 倍下行偏航距；

B_s - 船舶宽度(m)；

L - 船舶长度(m)；

β - 船舶航行偏航角($^\circ$)，取 6° 。

B.2 桥梁轴线法线方向与水流流向的交角大于 5° 时，通航净宽应加大，其增加值应符合表 2 的规定。

表 2 各级横向流速下通航净宽增加值

航道等级	通航净宽增加值 (m)				
	横向流速 0.4m/s	横向流速 0.5m/s	横向流速 0.6m/s	横向流速 0.7m/s	横向流速 0.8m/s
I	50	90	130	180	230
II	40	70	100	130	160
III	40	60	80	110	140

注：当横向流速为表中范围内某一值时，通航净宽增加值可采用内插法确定。

附录 C

(资料性)

紊流影响的通航净空宽度增加值计算方法

C.1 受桥梁墩柱附近紊流的影响，通航净空宽度增加值，可按下式计算：

$$E=0.88K_r V^{0.75} b^{0.56} h^{0.44} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

E -墩柱紊流宽度(m)；

K_r -与墩柱形状相关的系数，矩形墩取 1.2、圆柱墩与薄壁墩取 1.0、圆端墩取 0.8、尖头墩取 0.66；

V -墩前水流流速(m/s)；

b -墩形计算宽度(m)；

h -墩柱附近水深(m)。