

浙江省工程建设质量管理协会团体标准

T/ZCQMA ××××—2026

跨海长大桥梁非通航孔桥防船撞设计标准

Design standards for preventing ship collisions with non-navigable spans bridge
of long distance and large span cross-sea bridge

(征求意见稿)

2026—××—××发布

2026—××—××实施

浙江省工程建设质量管理协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	1
4 总体要求	5
5 主动监测预警系统设计	5
6 被动拦截设施设计	8
附录 A 分位值防船撞风险计算方法	19
附录 B 波浪力计算方法	20
附录 C 桥梁防船撞组合设计应用技术	21

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。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由浙江省工程建设质量管理协会提出、归口并组织实施。

本标准主要起草单位：浙江交工集团股份有限公司

本标准参与起草单位：招商局重庆交通科研设计院有限公司、西南交通大学、宁波大学、绍兴大学、温州大学、浙江师范大学

本标准主要起草人：

本标准主要审查人：

跨海长大桥梁非通航孔桥防船撞设计标准

1 范围

本标准规定了跨海长大桥梁非通航孔桥防船撞的一般要求、主动监测预警系统设计、被动拦截设施设计、分位值船撞风险计算方法、波浪力计算方法。

本标准适用于各等级公路新建、已建的跨海长大桥梁非通航孔桥的防船撞设计和防船撞监测预警系统运行。

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标准必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本标准；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB/T 549 电焊锚链

GB/T 700 碳素结构钢

GB/T 712 船舶及海洋工程用结构钢

GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓连接副

GB 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 3098.1 紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱

GB/T 3098.6 紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱

GB/T 4171 耐候结构钢

GB/T 20848 系泊链

GB 50661 钢结构焊接规范

GB 50204 混凝土结构工程施工质量验收规范

JTG/T 3310 公路工程混凝土结构耐久性设计规范

JTG/T 3360.01 公路桥梁抗风设计规范

JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范

JTG/T 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

3 术语和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1

非通航孔桥 Non-Navigational Span Bridge

位于通航水域以外，船舶正常航行不得穿越的桥梁区段。

3.1.2

主动监测预警系统 Intelligent Warning System

对桥区水域船舶运行状态进行实时监控，并对潜在船撞风险作出预判与响应的系统。一般具备超高监测、偏航监测、船速监测、轨迹预测和风险评估等核心功能。

3.1.3

超高监测模块 Vertical Clearance Monitoring Module

通过实时比对船舶水面以上最大高度与桥下可用通航净空高度，判定船舶是否超高的功能模块。

3.1.4

偏航监测模块 Off-Track Monitoring Module

对船舶实际航迹与设计航道中心线的偏离程度进行计算和预警的功能模块。

3.1.5

船速监测模块 Vessel Speed Monitoring Module

实时获取船舶航速数据，并与桥区限速进行比对的功能模块。

3.1.6

轨迹预测模块 Trajectory Prediction Module

基于当前船舶动态参数和历史行为，预测船舶未来一段时间内运动轨迹的功能模块。

3.1.7

风险预测模块 Collision Risk Prediction Module

综合分析船舶运行状态、环境因素与结构信息，评估碰撞可能性和撞击后果的功能模块。

3.1.8

被动拦截设施 Passive Barrier System

布设于非通航孔桥水域，用于拦截及缓冲失控船舶，以保护桥梁结构安全的防护设施。

3.1.9

独立式柔性拦截设施 Freestanding Flexible Barrier System

独立设置在桥区非通航水域，兜阻失控船舶并逐步消耗其能量，起到柔性拦截船舶从而保护桥梁的设施，主要由拦阻模块、支撑模块、锚固模块及消能模块等组成。

3.1.10

拦阻模块 Interception Module

拦阻模块作为直接兜住并拦截失控船舶的构件。

3.1.11

支撑模块 Support Module

支撑模块作为支撑拦阻模块并维持其工作状态的构件。

3.1.12

锚固模块 Anchorage Module

锚固模块作为拦截设施的系泊锚定构件。

3.1.13

消能模块 Energy Dissipation Module

消能模块作为消耗失控船舶动能的构件。

3.1.14

设防代表船型 Design Representative Vessel

设施抗撞设计时选定的代表船舶类型。

3.2 缩略语

3.2.1 AIS

船舶自动识别系统（Vessel Automatic Identification System），是船和岸、船和船之间的海事安全与通信的助航系统，能在电子海图上显示所有船舶可视化的航向、航线、船名等信息。

3.2.2 VTS

船舶交通服务（Vessel Traffic Service），是船舶管理机构设置的对船舶实施交通管制并提供咨询服务的系统。

3.2.3 VHF（船用）

VHF 是甚高频（Very High Frequency）的英文单词首字母组合，VHF（船用）是指进行船舶间、船舶内部、船岸间或经岸台与陆上通信转接的船与岸上用户间的无线电通信专用频段。

3.3 符号

v ——船舶撞击速度；

D ——设施至桥梁轴线距离；

D_i ——船舶拦截距离，即船舶拦停位置至设施原位置距离；

D_s ——安全距离，船舶拦停位置至桥梁轴线距离；

S_d ——作用效应值；

R_d ——柔性拦截设施构件的抗力性能；

γ_c ——船舶撞击作用的分项系数；

Q_{ck} ——船舶撞击荷载标准值；

ψ_{fs} ——风、水流荷载的组合系数；

γ_f ——风荷载的分项系数；

Q_{fk} ——风荷载标准值；

- γ_b ——波浪荷载的分项系数；
 Q_{bk} ——波浪荷载标准值；
 γ_s ——水流荷载的分项系数；
 Q_{sk} ——水流荷载标准值；
 E_c ——船舶撞击拦截设施的能量；
 E_1 ——失控船舶初始动能；
 E_2 ——环境荷载通过船舶输入能量；
 M ——设防代表船型质量；
 F_{s1} ——拦截过程中，作用在船舶的水流荷载；
 x ——船舶行进距离；
 C_s ——船舶阻水系数；
 A_s ——船舶阻水面积（ m^2 ）；
 ρ_s ——排开水密度（ kg/m^3 ）；
 v_c ——船舶速度（ m/s ）；
 F_f ——拦截过程中，作用在船舶的风荷载；
 v_s ——水流速度（ m/s ）；
 v_f ——风速（ m/s ）；
 C_f ——船舶受风形状系数；
 ρ_f ——空气密度；
 A_f ——船舶受风投影面积；
 W_i ——浮式基座及其附属结构第*i*个组成部分的重量；
 z_i ——该组成部分重心至基准面的高度；
 z ——体积单元几何中心至基准面的高度；
 T_m ——锚链破断强度；
 K_m ——锚链安全系数；
 F_q ——混凝土锚块的起锚力；
 η ——锚抓力系数；
 m ——锚块质量；
 g ——重力加速度；
 T_l ——拦阻网主缆索破断强度；
 K_l ——拦阻网主缆索安全系数；
 F_l ——在拦截船舶过程中，拦阻网主缆索受到的张拉力最大值；
 F_m ——锚链受到的最大张拉力；
 θ ——锚链与浮式基座连接处锚链轴线与水平线夹角；
 N_q ——在某分位值下的船舶序号；

- n ——航道全年具有船撞风险的通航船舶总数；
- q ——分位值；
- F_{b1} ——小尺度构件垂直于其轴线方向单位长度上的波浪力；
- F_D ——单位长度上的曳力；
- F_I ——单位长度上的惯性力；
- ρ_w ——流体密度；
- A ——单位长度构件在垂直于矢量 $(\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}})$ 方向上的投影面积；
- C_D ——曳力系数；
- C_A ——附连质量系数；
- C_M ——惯性力系数；
- V ——单位长度构件的体积；
- u ——垂直于构件轴线水质点速度分量；
- \dot{u} ——垂直于构件轴线水质点加速度分量；
- s ——垂直于构件轴线构件速度分量；
- \dot{s} ——垂直于构件轴线构件加速度分量；

4 总体要求

- 4.1 防船撞设计应综合桥梁重要性、通航环境和气象水文条件等因素进行，在设计使用年限内应满足规定状况下的桥梁防船撞的要求。
- 4.2 公路桥梁防船撞设计应满足桥区水域船撞风险评估相关要求。
- 4.3 主动监测预警系统应功能完备，具有可靠性、可维护性和可扩展性等特征。
- 4.4 被动拦截设施的设计使用年限不小于 15 年。
- 4.5 被动拦截设施结构应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。
- 4.6 被动拦截设施钢结构部分应根据需要进行抗疲劳设计。
- 4.7 被动拦截设施应按照设计使用年限和环境条件进行耐久性设计。

5 主动监测预警系统设计

5.1 一般要求

- 5.1.1 桥梁防船撞主动监测预警系统一般具备超高监测、轨迹预测、偏航监测、船速监测和风险评估等核心功能，能够主动采集并同步推送预警信息至船舶和相关管理机构，并对船舶违规行为与碰撞事故进行视频取证。
- 5.1.2 预警范围应包括桥区通航孔和船舶可能误入的非通航水域。
- 5.1.3 预警系统设计应充分考虑桥位、桥型、通航环境及船舶交通流特征。
- 5.1.4 预警系统应具备全天候运行能力，适应复杂气象和海况条件。

5.1.5 预警系统的监控范围应实现桥区水域的全覆盖，包括船舶允许通航水域和禁止驶入的非通航水域，其分为监测区、警戒区和预警区，如图 7.1.5。

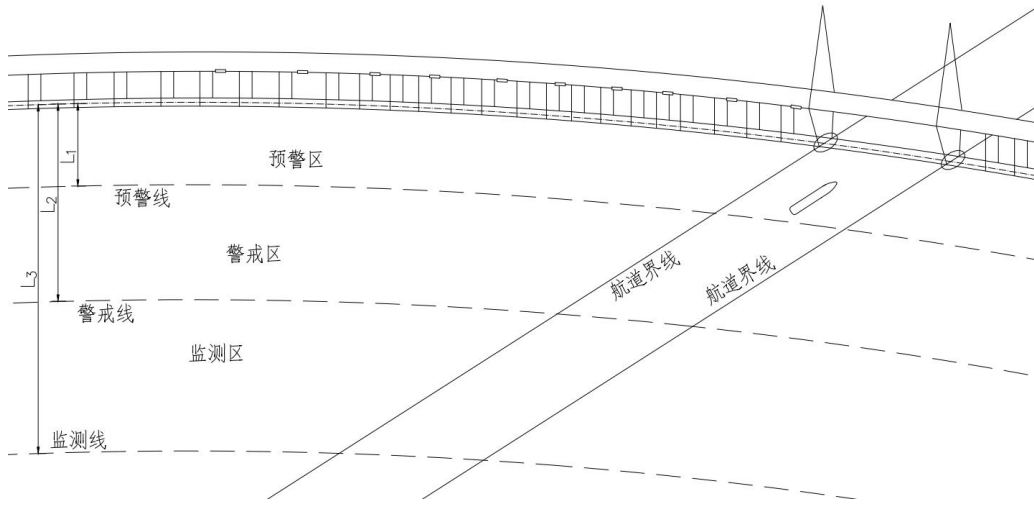


图 5.1.5 监控水域区域分类示意图

5.1.6 桥区水域各分区的监控要求，应符合下列规定：

1 监测区：预警系统对驶入监测线以内水域的船舶进行快速捕获和状态识别，并进行动态跟踪。

2 警戒区：预警系统对驶入警戒线以内水域的船舶的静态信息（如船名、MMSI 等）、高度、位置及速度信息进行实时采集。

3 预警区：预警系统对驶入预警线以内水域的船舶的高度、航速、航向、位置进行高精度测量并对船舶行驶轨迹进行预判和跟踪。

5.1.7 桥区各监控水域范围应根据船速统计、传感器与通信时延、轨迹预测能力及应急处置能力进行论证确定。当缺乏相关论证时，也可参照 5.1.7 式计算确定。

$$L_i = v_l \cdot t_i \quad (5.1.7 \text{ 式})$$

式中：

L_i ——各分区界线到桥轴线距离。 L_1 为预警线到桥梁轴线距离， L_2 为警戒线到桥梁轴线距离， L_3 为监测线到桥梁轴线距离（m）；

v_l ——设防代表船型桥区通航的限速值（m/s）；

t_i ——设防代表船型以限定航速航行到桥轴线航行时间。 t_1 为从预警线到桥轴线航行时间（s）； t_2 为从警戒线到桥梁航行时间（s）； t_3 为从监测线到桥梁航行时间（s）。

5.2 超高监测

5.2.1 采用激光测距、雷达或 AIS 等手段，实时监测船舶水面以上最大高度，并与桥下可用通航净空高度进行比对。桥下可用通航净空高度应按桥梁结构最低点（梁底）高程与实时水位高程之差计算，并扣除设计富裕高度。

5.2.2 对驶入警戒区的船舶应进行高度测量，超高监测误差应控制在±1m 以内；预警区的

船舶应进行高精度高度测量，超高监测误差应控制在±0.5m 以内。

5.2.3 非通航孔桥的超高判定阈值，应基于该孔梁底高程与实时水位的差值，并结合船舶类型、波浪影响及安全裕量综合确定；富裕高度不宜小于 0.5m。

5.3 轨迹预测

5.3.1 预警系统应根据船舶运动状态（航速、航向）及环境要素（风、浪、流），预测后续 5 分钟乃至后续 10 分钟的船舶运动轨迹。

5.3.2 轨迹预测算法应结合船舶动力学特征、历史航迹数据，具备自适应学习能力，以提高不同船型和运行工况下的预测精度。

5.4 偏航监测

5.4.1 系统应基于 AIS、雷达探测、视频识别或多传感器融合等技术，实时监测船舶航迹相对于通航航道中心线的偏离程度。

5.5 船速监测

5.5.1 系统应通过雷达测速、AIS 航速数据或视频分析等手段，实时监测船舶航行速度。

5.5.2 对驶入警戒线以内水域的船舶，应进行有效航速识别，测速误差应控制在±0.2m/s 以内。

5.6 风险预测

5.6.1 综合船舶高度及动态（航速、航向）、桥梁结构信息及环境因素，实时计算碰撞概率和潜在撞击能量。

5.6.2 桥区水域船舶运行风险等级分为低、中、高三级。不同风险等级对应的船舶运行情况 & 预警响应措施应符合表 5.6.2 的规定。

表 5.6.2 风险等级划分及响应措施

风险等级	船舶运行情况	预警响应措施
低	船舶进入监测区的航道外水域。	通过 VHF 对船舶进行提醒。
中	1 船舶进入警戒区的航道外水域； 2 船舶在警戒区航道内出现超高、超速或轨迹异常。	通过 VHF 对船舶进行告警。
高	1 船舶进入预警区的航道外水域； 2 船舶在预警区航道内出现超高或轨迹异常。	1 通过声、光、电手段对船舶进行告警； 2 将相关信息推送至海事及桥梁管理单位； 3 启动必要的应急措施。

5.7 系统集成

5.7.1 主动监测预警系统宜与被动防撞拦截设施、其他辅助设施协同运行，形成“监测—预警—防护”闭环机制。

5.7.2 数据融合与信息发布，应满足下列要求：

- 1 系统采用 AIS、雷达、视频等多源数据融合技术，提升监测精度和稳定性。
- 2 预警信息通过 VHF、LED 显示屏、移动终端等多渠道实时发布，确保信息可达性。

5.7.3 系统可靠性应满足下列要求：

- 1 关键设备应配置双电源、双通信链路等冗余措施，确保系统稳定运行。
- 2 定期开展模拟撞击测试和算法优化，系统误报率不应高于 5%，漏报率不得超过 1%。

5.7.4 主动监测预警系统应满足实时性要求，即自船舶行为满足任一预警触发条件（如进入预警区、出现超高、偏航或超速等）起，至预警信息成功推送至船舶及管理终端的全过程响应时间不应超过 15s。

5.8 系统验收

5.8.1 系统安装前应开展电磁兼容性测试，确保不干扰桥梁既有设备的正常运行。

5.8.2 系统验收，应包括以下项目及对应指标要求：

- 1 超高监测精度：警戒区 $\leq \pm 1\text{m}$ ，预警区 $\leq \pm 0.5\text{m}$ ；
- 2 船速监测精度： $\leq \pm 0.2\text{m/s}$ ；
- 3 预警响应时间：通过模拟船舶触发预警场景（如进入预警区并超高），实测从触发条件满足至预警信息成功推送的全过程耗时，结果不应大于 15s；
- 4 系统可用率：试运行期间 $\geq 99\%$ ；
- 5 误报率： $\leq 5\%$ ；
- 6 视频取证完整性：事件前后录像保存完整，分辨率不低于 1080P。

5.8.3 验收应提供不少于 3 个月的连续试运行报告，包含第 7.8.2 条所列系统各项验收项目的实测数据与性能评估结论。

6 被动拦截设施设计

6.1 一般要求

6.1.1 桥梁非通航孔水域的拦截设施设防范围与代表船型可根据桥区水域船撞风险评估的结论确定，也可根据桥区通航信息采用分位值法分析确定，详见附录 A。

6.1.2 结构性能验算应符合下式规定：

$$S_d \leq R_d \quad (8.1.2 \text{ 式})$$

式中：

- S_d ——拦截设施作用组合的效应设计值；
 R_d ——拦截设施构件的抗力设计值。

6.2 设施选型

6.2.1 防撞拦截设施选型应结合设防代表船型、运营环境、工程造价、材料性能等因素综合考虑。可按以下原则选取：

- 1 走锚消能型适用于所有设防等级船舶撞击防护。
- 2 动—势能转换型一般适用于 3000 吨级以下设防船舶撞击防护。
- 3 材料拉伸破断消能型一般适用于 5000 吨级以下设防船舶撞击防护。

6.3 材料

- 6.3.1 用于设施各部分构件混凝土的强度、弹性模量及耐久性设计要求，应符合现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG/T 3362）和《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T 3310）的规定，混凝土强度等级不宜低于 C35。
- 6.3.2 钢筋混凝土构件所采用的普通钢筋类别、强度、和弹性模量，应符合现行《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》（GB 1499.2）的规定。
- 6.3.3 设施各部分构件所采用的钢板、型材应符合现行《碳素结构钢》（GB/T 700）、《低合金高强度结构钢》（GB/T 1591）、《耐候结构钢》（GB/T 4171）及《船舶及海洋工程用结构钢》（GB/T 712）的规定。
- 6.3.4 紧固件所用材料应符合现行《钢结构用高强度大六角头螺栓连接副》（GB/T 1231）、《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》（GB/T 3098.1）及《紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱》（GB/T 3098.6）的规定。
- 6.3.5 钢结构用焊接材料应与母材相匹配,并符合现行《钢结构焊接规范》（GB 50661）的规定。
- 6.3.6 锚链类别、技术要求及物理性能指标，应符合现行《电焊锚链》（GB/T 549）和《系泊链》（GB/T 20848）的规定。
- 6.3.7 拦阻网宜采用超高分子量聚乙烯、芳纶纤维等高强度、耐腐蚀材料，其力学性能和耐久性应满足设施设计使用要求，并符合国家或行业现行相关标准的规定。
- 6.3.8 破断型消能索材料通常可采用涤纶绳、超高分子量聚乙烯、芳纶纤维等，强度及耐久性应满足设计使用要求，并符合国家或行业现行相关标准的规定。
- 6.3.9 轻质复合材料浮体，芯体可采用 PE、PU、EVA 等，外表面宜用橡胶、聚脲包裹，相关材料其强度及耐久性应满足设计使用要求，其性能指标应符合国家或行业现行相关标准的规定。

6.4 作用分类、工况及作用组合

- 6.4.1 拦截设施设计采用的作用分为永久作用和可变作用，见表 6.4.1。

表 6.4.1 作用分类

序号	分类	名称
1	永久作用	结构重力（包括结构附加重力）
2		静水浮力
3	可变作用	船舶撞击作用
4		风荷载
5		水流荷载
6		波浪荷载

- 6.4.2 设计应考虑以下三类工况：

1 船舶撞击工况：通航条件下的失控船舶撞击拦截设施的工况，应用于消能能力设计与结构强度计算。该工况下的作用组合为组合一和组合二。

2 极端环境工况：非通航条件下的极端环境（风、波浪、水流）工况，应用于拦截设施稳定性及强度验算。该工况下的作用组合为组合三。

3 正常运营工况：设施正常运营期间在波浪荷载作用下的工况，应用于钢结构疲劳验算。该工况下的作用组合为组合四。

6.4.3 作用组合

本标准作用组合参考《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60—2015）第 7.1.6 条偶然作用组合原则，并结合船撞特殊性调整。

1 作用组合一（船舶撞击+水阻力）——承载能力极限状态

$$S_d = \gamma_c Q_{ck} \quad (6.4.3-1)$$

式中：

S_d ——船舶在考虑水阻力作用下对设施的撞击作用效应值；

γ_c ——船舶撞击作用的分项系数，取 1.0；

Q_{ck} ——船舶撞击作用标准值，考虑水阻力对船舶的耗能作用，水流速度取 0m/s。

2 作用组合二（船舶撞击+风+流）——承载能力极限状态

$$S_d = \gamma_c Q_{ck} \quad (6.4.3-2)$$

式中：

S_d ——船舶在考虑风、流组合作用下对设施的撞击作用效应值；

γ_c ——船舶撞击作用的分项系数，取 1.0；

Q_{ck} ——船舶撞击作用标准值，考虑风、水流荷载对船舶的作用。风速、水流速度分别按海事部门规定的通航环境条件所限的风速、水流速度取定；

3 作用组合三（极端风+浪+流）——承载能力极限状态

$$S_d = \gamma_b Q_{bk} + \psi_{fs} (\gamma_f Q_{fk} + \gamma_s Q_{sk}) \quad (6.4.3-3)$$

式中：

S_d ——风、浪、流组合对设施的作用效应值；

γ_b ——波浪荷载的分项系数，取 1.0；

Q_{bk} ——波浪荷载标准值；

ψ_{fs} ——风、水流荷载的组合系数，取 0.75；

γ_f ——风荷载的分项系数，取 1.0；

Q_{fk} ——风荷载标准值；

γ_s ——水流荷载的分项系数，取 1.0；

Q_{sk} ——水流荷载标准值。

4 作用组合四（波浪）——正常使用极限状态（疲劳）

$$S_d = \gamma_b Q_{bk} \quad (6.4.3-4)$$

式中：

S_d ——波浪对设施的作用效应值；

γ_b ——波浪荷载的分项系数，取 1.0；

Q_{bk} ——波浪荷载标准值。

6.5 船舶撞击作用

6.5.1 船舶撞击拦截设施的能量包括两个部分：

$$E_c = E_1 + E_2 \quad (6.5.1-1)$$

式中：

E_c ——船舶撞击拦截设施的能量（J）；

E_1 ——失控船舶初始动能（J）；

E_2 ——环境荷载输入能量（J）。

6.5.2 初始动能

1 失控船舶初始动能按下式计算：

$$E_1 = \frac{1}{2} M v^2 \quad (6.5.1-2)$$

式中：

M ——设防代表船型满载排水量（kg）；

v ——船舶撞击拦截设施时的初始速度（m/s）。

2 设防代表船型根据桥区水域船撞风险评估或通过对通航信息采用分位值法分析（见附录 A）确定。

3 采用分位值分析法确定的设防代表船型在桥区不同非通航水域可按下列规定确定：

（1）双向通航航道：航道右侧非通航水域迎船侧设防代表船型宜采用其 5%分位值确定，离船侧宜采用其 50%分位值确定，如图 8.5.2—1；

（2）单向通航航道：航道两侧非通航水域迎船侧设防代表船型均宜采用其 5%分位值确定，如图 8.5.2—2。

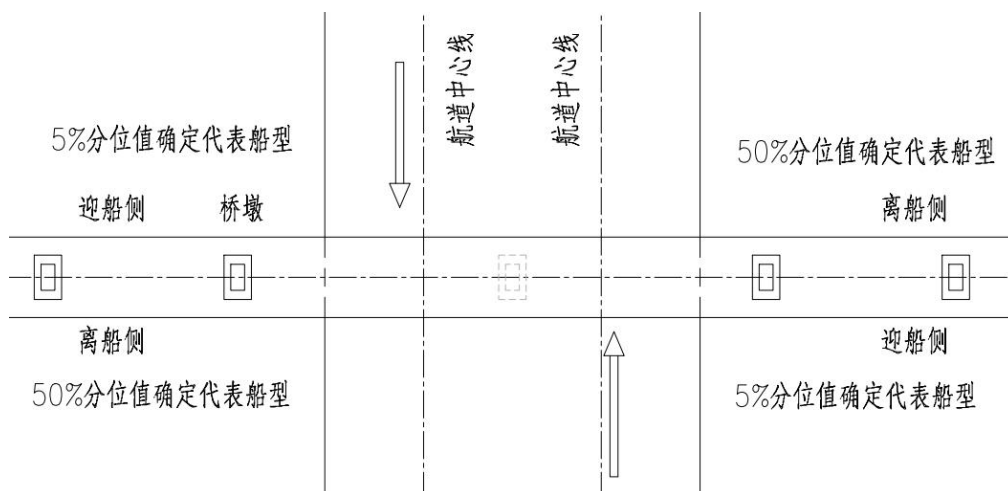


图 6.5.2—1 双向通航航道

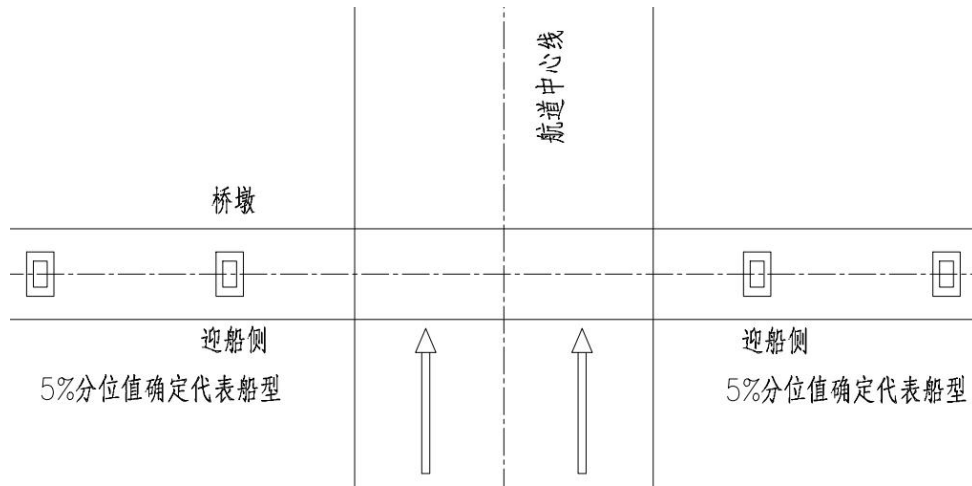


图 6.5.2—2 单向通航航道

4 船舶撞击拦截设施时的初始速度取值分以下两种情况：

- (1) 作用组合一：取按海事部门规定的通航环境条件所限的桥区通航的限速值。
- (2) 作用组合二：取桥区通航的实测数据统计中位值。

6.5.3 环境荷载输入能量符合下列规定：

1 作用组合一：

$$\begin{cases} E_2 = -F_s \cdot x \\ F_s = \frac{1}{2} C_s \rho_s A_s v_c^2 \end{cases} \quad (6.5.3-1)$$

式中：

- E_2 ——环境荷载输入能量 (J)；
- F_s ——拦截过程中，作用在船舶的水阻力 (N)；
- x ——船舶行进距离 (m)；
- C_s ——船舶形状系数；
- A_s ——船舶阻水面积 (m²)；
- ρ_s ——排开水密度 (kg/m³)；
- v_c ——船舶速度 (m/s)。

2 作用组合二：

$$\begin{cases} E_2 = (F_s + F_f) \cdot x \\ F_s = \frac{1}{2} C_1 \rho_s A_1 (v_c - v_s) |v_c - v_s| \\ F_f = \frac{1}{2} C_f \rho_f A_f (v_c - v_f) |v_c - v_f| \end{cases} \quad (6.5.3-2)$$

式中：

- F_f ——拦截过程中，作用在船舶的风荷载 (N)；
- v_s ——水流速度 (m/s)，按通航条件下海事部门所限的水流速度取定；
- v_f ——风速 (m/s)，按海事部门规定的通航环境条件所限的风速取定；
- C_f ——船舶受风形状系数；

ρ_f ——空气密度 (kg/m^3)；

A_f ——船舶受风投影面积 (m^2)。

6.6 环境荷载

6.6.1 风荷载

1 风荷载计算应符合现行《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360.01)相关规定,应考虑风向与拦截设施轴线的最不利夹角。

2 极端环境工况的风速采用重现期与拦截设施设计使用年限等同的 10min 平均风速。

6.6.2 水流荷载

1 水流荷载计算可参照现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG/T D60)的流水压力计算公式,应考虑流向与设施轴线的最不利夹角。

2 极端环境工况下采用重现期与拦截设施设计使用年限等同的垂线平均流速。

6.6.3 波浪荷载

1 波浪荷载计算宜采用 Morison 方程或绕射理论方法(见附录 B),应考虑浪向与结构物的最不利作用方向。

2 极端环境工况下波浪要素应采用与拦截设施设计使用年限等同的重现期的波高、周期等参数。

3 在正常运营工况下,波浪要素宜基于波浪谱分析,并结合结构动力特性开展频域与时域响应分析,从而选取合理的有效波高、特征周期等参数。

6.7 总体设计

6.7.1 设防范围

1 拦截设施设防范围应根据桥区船撞风险评估结果,并结合安全性、经济性与环境协调性综合确定。

2 拦截设施设防范围从通航孔外侧桥墩中心线起,向非通航水域延伸宜取 2 倍设防代表船型船长。

3 桥区不同设防范围宜按第 6.5.2 条确定的设防代表船型布置相应的拦截设施。

6.7.2 平面布置

1 拦截设施宜采用与桥梁轴线夹角不大于 15° 的线性布置,布置方向与失控船舶航迹线方向垂直。

2 拦截设施距桥梁轴线的距离(见图 6.7.2)：

$$D = D_i + D_s \quad (6.7.2)$$

式中：

D ——拦截设施至桥梁轴线距离 (m), 宜取 2 倍设防代表船型船长；

D_i ——船舶拦截距离,即船舶拦停位置至拦截设施原位置距离 (m), 宜取 1 倍设防代表船型船长；

D_s ——安全距离,船舶拦停位置至桥梁轴线距离 (m), 不应小于 1 倍设防代表船型

船长。

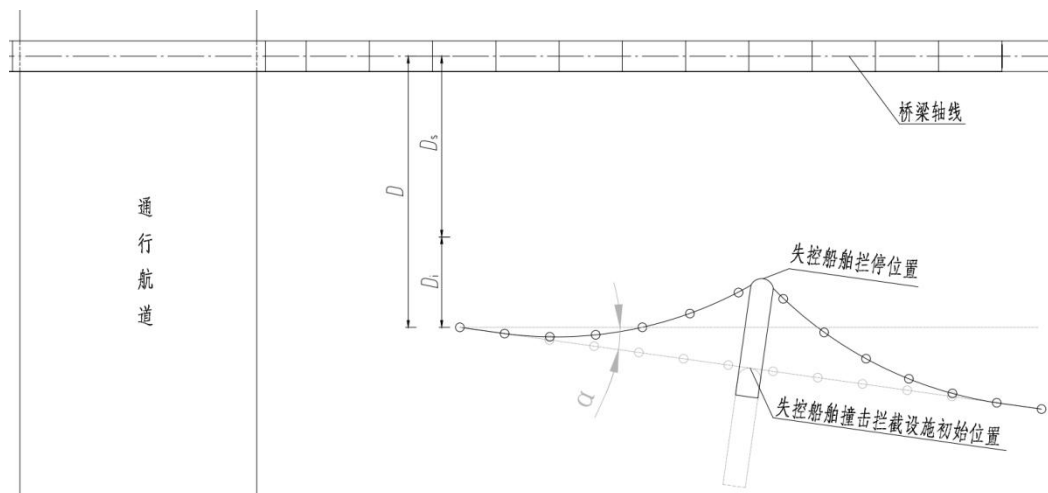


图 6.7.2 拦截设施拦停失控船舶示意图

6.7.3 总体设计流程

1 基于能量消耗原理，通过迭代计算使船舶拦截距离理论值与目标值的相对偏差不超过±5%（且绝对偏差不大于2m），从而初步确定消能构件数量与规格，然后进行极端环境工况下相关构件强度验算，最终确定拦截设施总体布置及各构件具体设计，设计流程如下图所示。

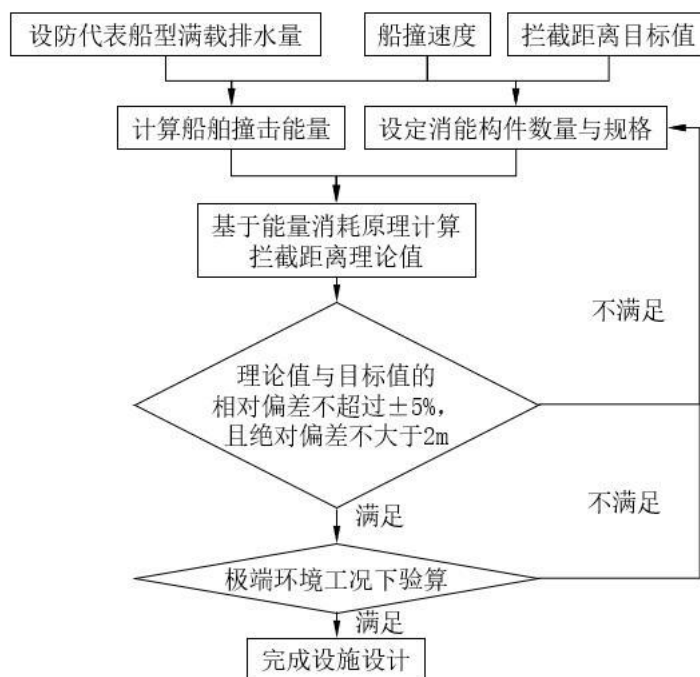


图 6.7.3 设计流程

2 基于能量消耗原理，对船舶拦截状态进行判断，应符合下列公式：

$$E_c \leq E_x \tag{6.7.3 式}$$

式中：

E_c ——船舶撞击拦截设施的能量；

E_x ——拦截距离内消能模块消耗的能量。

6.8 构造设计

6.8.1 一般规定

1 拦截设施宜采用模块化构造，满足标准化设计、工厂化加工、装配化施工要求，便于施工、维修更换及管养。

2 应根据水文条件及设防船型特点确定各模块的尺寸与结构形式。

3 各构件应可靠连接，并保持合理空间位置关系，以免在运营过程中相互干扰、碰撞、磨损。

4 构件设计应考虑养护需要，满足可到达、可检查、可维修和可更换的要求。

6.8.2 拦阻模块

1 拦阻模块由拦阻网及连接构件组成（如图 6.8.2 所示），主要起到直接拦截失控船舶和传递船舶能量的作用。

2 拦阻网通常由高强度材料编织成网状结构，由横向主缆索、竖向辅助索及挂网索构成，主缆索宜不少于 2 根，与消能模块可靠连接。

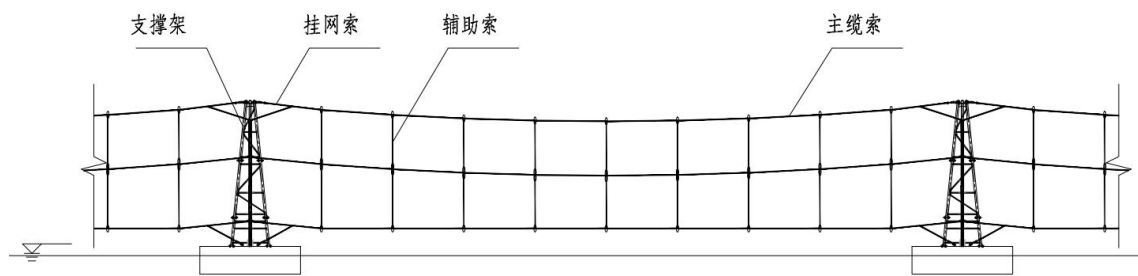


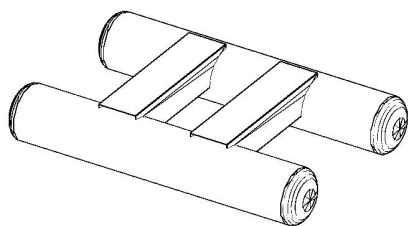
图 6.8.2 拦阻模块示意图

6.8.3 支撑模块

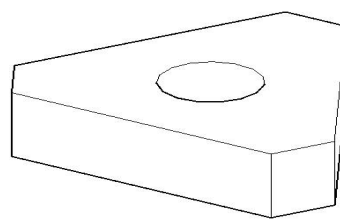
1 支撑模块通常由基座与支撑架组成。支撑架固定在基座上，起到支撑展开拦阻网的作用。

2 支撑模块布设间距应结合拦截距离、结构响应、工程造价与景观协调性综合确定。

3 基座可分位浮体式或固定式两种型式，一般浮式基座最为普遍。浮式基座采用钢制浮筒或轻质材料浮体，可采用双体船、三角式、三叉式、圆筒式等型式（如图 5.8.3—1 所示）；固定式基座宜采用高桩承台形式，桩基可选预应力管桩、钢管桩或钻孔灌注桩；



(a) 双体船



(b) 三角式

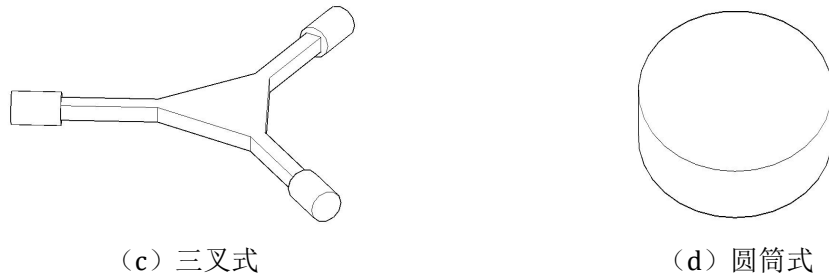


图 6.8.3—1 浮式基座形式示意图

4 浮式基座在完全浸没状态下，其排水量所产生的浮力应不小于其受到的竖向荷载的 1.5 倍。竖向荷载包括拦阻模块、支撑模块自重及静水状态的锚链张力竖向分量。

5 承受竖向荷载的浮式基座重心应低于浮心，且浮式基座顶面露出水面高度不宜小于 50cm。

6 支撑架一般采用钢桁架结构，其上设置挂网构件、检修设施及附属构件。

7 支撑架高度应满足拦阻网上主缆索最低点高于 $1/2$ 船舷（无船鼻艏）或船鼻艏顶部。

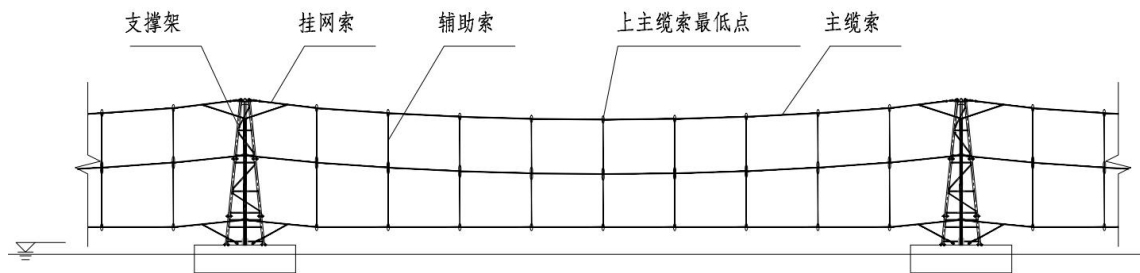


图 6.8.3—2 上主缆索最低点示意图

6.8.4 锚固模块

1 锚固模块由锚碇、锚链及连接件等组成。

2 用于单个浮式基座系泊的锚链数量不应少于 3 根，其强度、耐腐蚀性及防磨损性能应满足设计使用年限内支撑模块的系泊与稳定性要求。

3 系泊锚链的长度不小于 2 倍水深，正常运营状态保持悬链线线形，且保留一定长度的拖地链：

4 锚碇一般采用混凝土锚块，必要时可增设钢管锚，以提高拦截设施在极端环境工况下的稳定性。锚碇与浮式基座的水平距离不宜小于 1.5 倍水深。

5 钢管锚采用水下钢管桩形式，桩顶露出水下泥面不宜超过 1m。

6.8.5 消能模块

1 走锚消能型拦截设施的消能模块主要由消能锚、锚链及附属连接件等组成，与拦阻模块可靠连接。消能锚通常采用混凝土锚块，其与海床的摩阻力系数可根据实测数据或采用经验值。

2 动—势能转换型拦截设施的消能模块主要由消能配重块、系挂链索及附属连接件等组成，与拦阻模块可靠连接。消能配重块通常可采用混凝土、金属材料制成。

3 材料破断消能型拦截设施的消能模块主要由破断型消能索及附属连接件等组成，与拦阻模块可靠连接。

6.8.6 附属设施

根据运营需求，宜设置定位装置、警示标志与监测等装置。

1 定位装置是安装在支撑架上的卫星定位设备，具有实时监测支撑模块位置的功能，据此可判断拦截设施总体线形状态。

2 警示标志一般为安装在支撑架的警示灯，具有夜间标示拦截设施的警示功能。

3 监测装置通常包括锚链张力测力装置、环境参数采集设备等，具有实时监测系泊状态及环境指标的功能，附属设施的数据应具备远程传输与本地存储功能，与主动监测预警系统结合，为设施运行状态评估和异常预警提供技术支持。

6.9 结构计算

6.9.1 船舶撞击工况

1 拦截设施构件在船舶撞击工况下进行承载能力极限状态设计。

2 在拦截船舶过程中，锚链破断强度应满足：

$$T_m \geq K_m F_m \quad (6.9.1-1)$$

式中：

T_m ——锚链破断强度（kN）；

K_m ——锚链安全系数，一般不小于 2；

F_m ——在拦截船舶过程中锚链受到的最大张拉力（kN）。

3 在拦截船舶过程中，拦阻网主缆索破断强度应满足：

$$T_l \geq K_l F_l \quad (6.9.1-2)$$

式中：

T_l ——拦阻网主缆索破断强度（kN）；

K_l ——拦阻网主缆索安全系数，一般不小于 3；

F_l ——在拦截船舶过程中，拦阻网主缆索受到的最大张拉力（kN）。

4 支撑架在受到船舶直接撞击时，在保证拦阻模块与消能模块可靠连接的前提下，可允许破坏。

6.9.2 极端环境工况

1 对拦截设施结构进行承载能力极限状态与正常使用极限状态设计。

2 锚固模块不应出现失效、走锚，锚链受到的最大张拉力应满足：

$$F_m < F_q / \cos \theta \quad (6.9.2)$$

式中：

F_m ——极端环境工况下，锚链受到的最大张拉力（kN）；

F_q ——混凝土锚块的起锚力（kN）；

θ ——锚链与浮式基座连接处锚链轴线与水平线夹角（°）。

3 拦阻模块的拦阻网不应从支撑架上脱落，挂网索与相关连接构件强度应满足计算要求。

4 材料破断耗能型拦截设施的耗能模块不应发生材料破断。

6.9.3 正常运营工况对钢构件进行疲劳验算，确保在拦截设施设计使用年限内的结构可靠。

6.10 耐久性设计

6.10.1 拦阻网材料运营期间应开展实地环境暴露试验，以验证材料的力学性能退化趋势，确定合适的更换周期，各规格缆索试验组数不小于 5 组，长度须满足拉拔试验要求。拦阻网表面宜喷涂抗紫外线、耐磨性好的保护层，如聚脲涂层。

6.10.2 钢结构宜采用船用钢、耐候钢，表面防腐涂层应进行专项设计，水下部分应设置牺牲阳极。

6.10.3 钢结构紧固件应根据环境腐蚀等级选用相应材料或防护方式，常用材料包括不锈钢或经铝热喷涂、热浸镀锌处理的碳钢。螺栓外露部分宜采取密封或隔离措施。

6.10.4 螺栓应采用双螺帽或其他能防止螺帽松动的有效措施。

6.10.5 浪溅区段锚链宜采用耐腐蚀的系泊链，其他区域可采用电焊锚链，其链径应考虑腐蚀余量。

6.11 环保与景观设计

6.11.1 拦截设施构造与材料应尽量减少对水域生态的影响。

6.11.2 拦截设施外观、色彩宜与桥区景观协调。

6.12 养护条件设计

6.12.1 应考虑运营期间的养护检修需求，提出后期检测、养护的周期与内容。

6.12.2 根据检测结果评估构件性能，明确构件更换条件及周期。

6.13 全生命周期维护管理

6.13.1 被动拦截设施应制定 15 年期维护计划，涵盖日常巡检、定期检测、应急修复与部件更换。

6.13.2 日常巡检：每月不少于 1 次无人机或视频巡查，检查整体线形、模块倾斜、拦网垂度异常等。

6.13.3 定期检测：每 5 年进行一次全面检测，包括：

- 1 拦阻索破断力测试（抽样不少于 5 组）；
- 2 锚链磨损、腐蚀与有效截面积检测；
- 3 浮体气密性与浮力验证。

6.13.4 构件更换条件：

- 1 拦阻索实测破断力 < 设计破断力的 3 倍；
- 2 锚链有效截面积损失 > 15%；
- 3 浮体浮力下降 > 20%。

6.13.5 所有检测与维护数据应接入桥梁数字孪生平台，实现状态可追溯、风险可预警。

附录 A 分位值防船撞风险计算方法

A.0.1 原理介绍

将近一年内具有船撞风险的通航船舶按吨位从大到小排序，根据预设分位值选取设防代表船型。

$$N_q = 1 + (n - 1)q \quad (\text{A.0.1})$$

式中：

N_q ——在某分位值下的船舶序号；

n ——航道全年的通航船舶总数；

q ——分位值。

A.0.2 具体案例

如某跨海长大桥梁为双向通航航道，该航道全年具有船撞风险的通航船舶按载重吨位从大到小排序结果为（3000；2000；2000；1500；1500；1500；1500；1000；1000；1000；1000；1000；1000；500；500；500；500），船舶单位 DWT，总数为 17，则 5%分位值的船舶序号为：

$$N_{0.05} = 1 + (17 - 1) \times 5\% = 1.8$$

经过计算，5%分位值的船舶序号为 1.8，将结果四舍五入，5%分位值的船舶序号为 2，则设防代表船型为排序结果第二位置的 2000DWT。同理，50%分位值的船舶序号为 9，则设防代表船型为排序结果第九位置的 1000DWT。

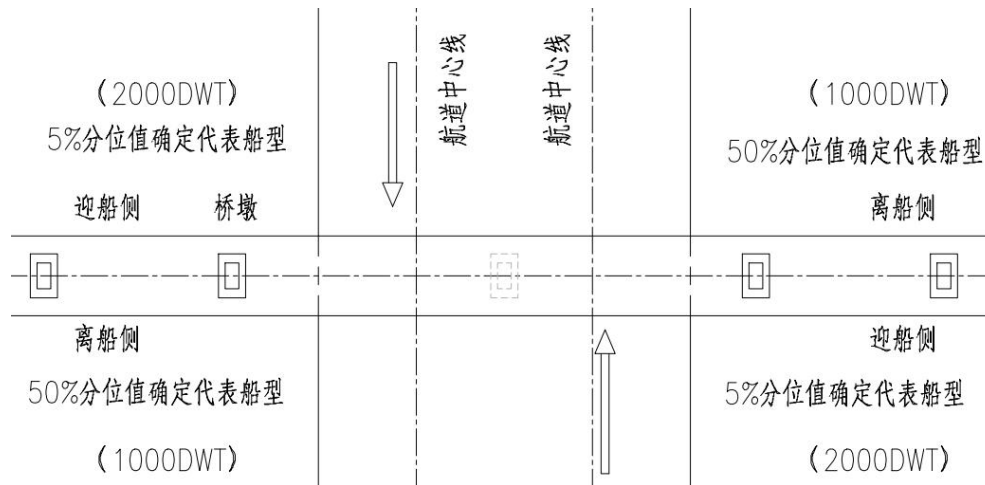


图 A.0.2 双向通航航道非通航区域设防代表船型分布示意图

附录 B 波浪力计算方法

B.0.1 Morison 公式法

Morison 公式适用于细长柱状结构受波浪作用的情形，当 $D/L < 0.2$ （ D ：构件截面的特征尺度， L ：波长）时，宜采用 Morison 公式计算。

Morison 方程将波浪力简化为惯性力与阻力的叠加：

$$F_{b1} = F_D + F_I \quad (\text{B.1-1})$$

其中：

F_{b1} ——小尺度构件垂直于其轴线方向单位长度上的波浪力（kN/m）；

F_D ——单位长度上的曳力（kN/m）， $F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D A |u - \dot{s}|(u - \dot{s})$ ；

F_I ——单位长度上的惯性力（kN/m）， $F_I = \rho_w C_A V(\ddot{u} - \ddot{s}) + \rho_w V \dot{u} = \rho_w V(C_M \ddot{u} - C_A \ddot{s})$ ；

ρ_w ——流体密度（t/m³）；

A ——单位长度构件在垂直于矢量 $(u - \dot{s})$ 方向上的投影面积（m²/m）；

C_D ——曳力系数；

C_A ——附连质量系数；

C_M ——惯性力系数， $C_M = C_A + 1$ ；

V ——单位长度构件的体积（m³/m）；

u ——垂直于构件轴线水质点速度分量（m/s），当海流与波浪联合作用时， u 为波浪水质点的速度矢量与海流速度矢量之和在垂直于构件方向上的分量；

\dot{u} ——垂直于构件轴线水质点加速度分量（m/s²）；

\dot{s} ——垂直于构件轴线构件速度分量（m/s）；

\ddot{s} ——垂直于构件轴线构件加速度分量（m/s²）。

B.0.2 绕射理论法

当 $D/L \geq 0.2$ （ D ：构件截面的特征尺度， L ：波长）时，宜采用绕射理论；在绕射理论中，流场用速度势函数来描述，该速度势应在流体各处满足拉普拉斯方程，并满足物体表面、自由表面、海底及无穷远处的边界条件。通常总速度势由入射势、绕射势（假定物体固定）和运动着物体在静水中产生的辐射势组成。

附录 C 桥梁防船撞组合设计应用技术

跨海长大桥梁非通航孔桥防船撞组合设计应用技术，包括非通航孔桥防船撞“主动监控预警系统”和非通航孔桥防船撞“被动柔性拦截设施”等两部分设计组合而成。

C.1 主动监控预警系统

C.1.1 防控区域

如某跨海长大桥梁非通航孔桥防船撞主动监测预警系统监控区域完全覆盖整个桥区海域，距桥梁中心两侧 5000m 至 3000m 水域划分为监测区域，距桥梁中心两侧 3000m 至 1500m 水域划分为警戒区，在通航孔海域距桥轴线上下游 1500 米内为预警区。

C.1.2 功能部署

非通航孔桥防船撞主动监控预警系统主要功能如下：

1 船舶超高识别及预警

船舶高度测量模块可实现全天候对桥区水域通航船舶作水上高度自动跟踪测量，主要功能包括：彩色、黑白和红外夜视多通道成像、远距离多目标船舶距离自动测量、多目标船舶自动识别、自动跟踪、有效监测范围内的通航船舶进行水上高度测量、重点船舶水上高度监测。利用船舶影像及轨迹数据进行图像模式识别、数据融合、自动捕获及检测高风险船舶，结合船舶轨迹行为特征，对航行轨迹异常行为进行侦测，基于实时测量高度，并根据桥下实时通航净高，对超高船舶进行分级预警。

2 船舶偏航监测及预警

系统在桥梁区域设置热像仪、雷达及 AIS 等数据，多源融合形成船舶运行轨迹数据，探测船舶是否越界通航，并对船舶的运行轨迹进行预判。针对越界航行船舶和轨迹行为异常船舶，发出报警信号，并录像取证。

3 船舶航迹在线预测

基于循环神经网络的船舶轨迹预测算法，智能、稳定、可靠的提前判断船舶航迹，前置化偏航预警响应，为驾驶者争取更多的纠正时间。

4 船舶超速监测及预警

系统通过雷达数据或接收船舶的 AIS 信号采集到进入桥区所有船舶的速度数据，一旦超过设定的安全速度，系统自动向船舶发出告警信号。

5 非通航孔识别

系统通过视频、雷达数据或接收船舶的 AIS 信号采集桥区所有船舶的位置信息，一旦发现船舶非法停泊在桥区禁停区域或有船舶误入非通航水域，系统自动向船舶发出告警信号。

6 违规掉头、锚泊预警

通过前端数据整理，以 AI 算法为核心建立船舶违规掉头、抛锚等行为的数据处理库，针对这些违规行为进行预警，同时也可根据行业管理人员的要求，添加更多的预警业务需求。

7 水文气象监测

通过现场设置的气象感知设备，第一时间获取浓雾、大风、暴雨等异常气象信息，根据等级进行航道管理。

8 桥区全域监控及事故取证

桥区布置一定数量的摄像头，覆盖桥区水域，对过往船舶进行实时监控，重点船舶进行取证抓拍，碰撞事故进行取证。并保留一定的时间周期。

9 数据查询及大数据分析

系统将采集到的环境数据、船舶数据等进行清洗、归类及存储，管理人员可针对数据类别实时查询调阅。同时系统可对采集的数据进行数据分析、数据挖掘、数据画像等功能，挖掘系统潜在功能，对桥梁管理单位、桥区水域监管单位、过往船舶船户等单位提供服务，为桥区通航和信息化建设服务。

10 船撞风险概率识别

根据船舶的高度、速度、位置等信息，实时分析船舶撞击桥墩的概率和桥墩被撞击的概率，根据风险程度可设置预警等级及响应分级制度，做到精准预判，适当预警。

11 声光预警告警

建立预警告警机制，系统发现桥区存在安全隐患时，信息通过声光电等多方发布，同时通过 APP、短信等通知船户、管理单位等，多种资源调用，严防事故方式。

12 白名单设置

非通航孔桥海域通航船舶种类繁多，除货船、客船等营运船舶外，有公务船、军舰、执法船只、海事船只等定期巡检，这些船舶具有在进入禁航区域的权限，系统可根据船户识别和标定，当这类船舶进入禁航区域内时，给出准确的提示，减少由此引发的预警信息误报和虚报。

C.2 被动柔性拦截设施

桥梁防船撞系统“主动监控预警系统+被动柔性拦截设施”组合设计的被动柔性拦截是一种物理拦截，其消能原理属于走锚消能型。

C.2.1 拦阻设施布置

如某跨海长大桥梁非通航孔桥防船撞柔性拦截设施应用新型材料浮基分级走锚消能船舶拦截设施。其设防区域为：主通航孔桥两侧非通航孔桥区域、南通航孔桥两侧非通航孔桥区域、北通航孔桥两侧非通航孔桥区域及长白互通西北侧。

桥梁非通航孔防船撞柔性拦截设施相关技术指标，根据桥区水域船撞风险评估要求取值，见表 C.2.1:

表 C.2.1 如某跨海大桥非通航孔防船撞柔性拦截设施技术指标

序号	分类		防撞等级	距桥轴线最小距离 (m)	设防长度 (m)
1	南通航孔	东南侧	10000DWT	300	150
2		西南侧		300	300
3		东北侧		300	300
4		西北侧		300	150
5	主通航孔	东南侧	10000DWT	300	450
6		西南侧	20000DWT	350	600
7		东北侧		350	600
8		西北侧	10000DWT	300	450
9	北通航孔	东南侧	2000DWT	200	150
10		西南侧		200	150
11		东北侧		200	300
12		西北侧		200	150
13	长白互通西北侧		500DWT	50	910
14	小计		20000DWT	350	1200
15			10000DWT	300	1800
16			2000DWT	200	750
17			500DWT	50	910
18	合计		/	/	4660

C.2.2 拦阻设施结构体系

桥梁非通航孔防船撞柔性拦截设施由拦阻模块、支撑模块、锚固模块、消能模块等组成，如下图所示。

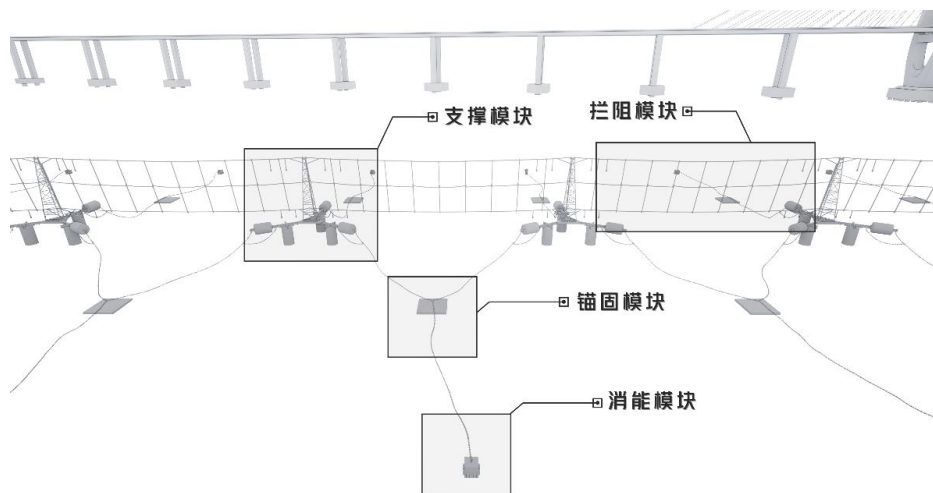


图 C.2.2-1 新型浮基分级走锚消能拦阻设施组成示意图

C.2.2.1 拦阻模块

拦阻模块主要由拦阻网组成，主要起到拦截失控船舶和传递船舶能量的作用。拦阻网由拦阻索及辅助索组成。拦阻索是主要的受力索，辅助索将各拦阻索联系起来，起到成网的作用，并将船撞力传递给各拦阻索，使各拦阻索共同受力。上下拦阻索的两端均设置多根挂网索，以便对拦阻网的垂度进行调整，确保拦阻网达到拦阻的功能及美观性。拦阻网构造示意图如下。

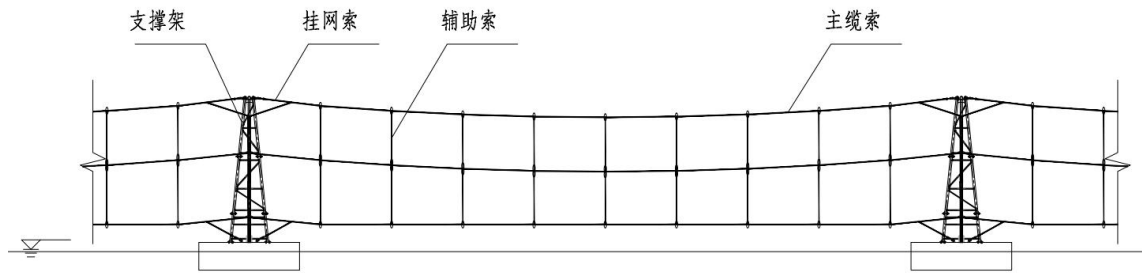


图 C.2.2-2 拦阻网构造示意图

拦阻绳采用 HMPE（高模量聚乙烯）索。

C.2.2.2 支撑模块

(1) 浮式基座

浮式基座采用三叉形结构。如下图所示：

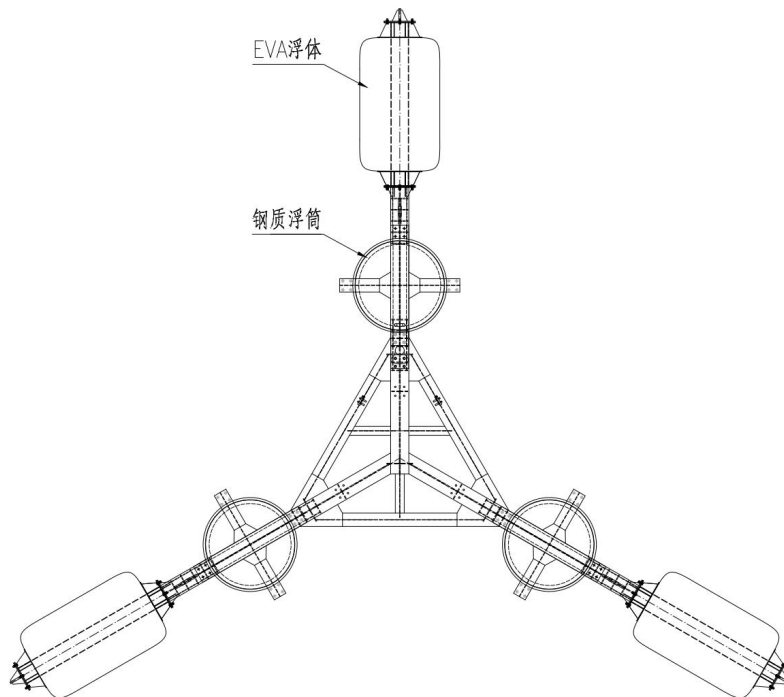


图 C.2.2-3 浮式基座示意图

非通航孔桥柔性拦截设施拦阻网浮式基座浮体采用钢质浮筒与 EVA（乙烯-醋酸乙烯共聚物）浮体组合。EVA 是一种高分子材料，具有很多优点，使其成为海上浮体设计的理想选择。

(2) 支撑架

浮基支撑架起到支撑拦阻网的作用。浮基支撑架采用无缝圆钢管，以避免运营过程中拦阻绳与浮基支撑架的触碰及摩擦所可能导致的拦阻索断裂。浮基支撑架的高度根据非通航孔区域防撞设防等级对应的船舶船艏高度进行设置。

C.2.2.3 锚固模块、消能模块

(1) 锚链及锚链附件

系泊锚链起到两方面的作用，一方面在运营阶段起到将浮基系泊锚定的作用，另一方面当有失控船舶撞击时，起到将撞击力传递到锚体的作用。

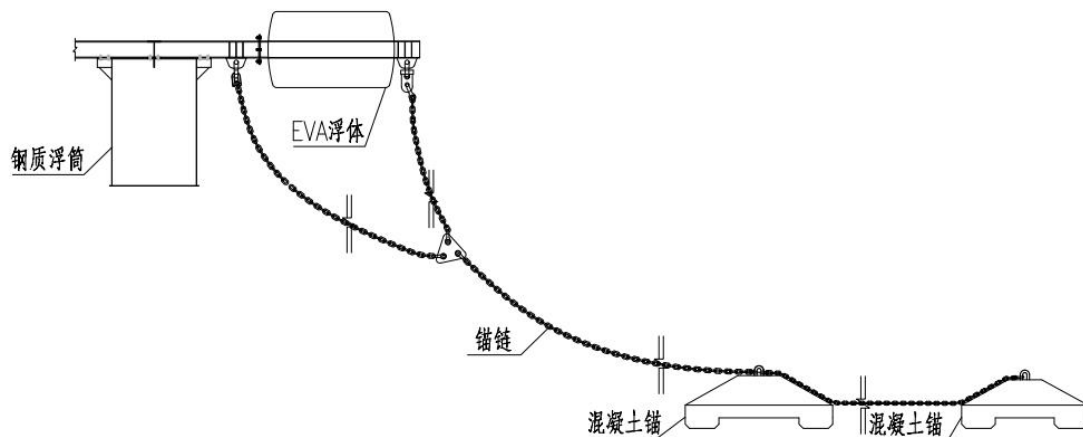


图 C.2.2-4 锚固模块、消能模块示意图

(2) 系泊锚及消能锚

系泊锚连接着锚链，船舶撞击力通过锚链，传递到系泊锚。运营阶段，系泊锚即有系泊锚定浮基的作用，同步当船舶撞击时，也起着走锚消能作用。

消能锚通过锚链与系泊锚相连。当船舶撞击时，撞击力通过锚链传递到系泊锚，当传递的撞击力超过系泊锚的系泊力时，系泊锚走锚，带动消能锚链，锚链带动消能锚走锚，与系泊锚一起消能。

(3) 钢管锚

钢管锚起到了辅助系泊的作用，设置于每一联拦阻设施的端部，为保证线型，部分较长的拦阻设施跨中位置也设置钢管锚。

C.2.3 工作原理

当偏航大船撞击物理拦截设施时，拦阻网包裹船一起移动并将力传递到相邻支撑模块和锚固、消能模块。近撞击点的支撑模块拔出、拖动锚块消耗船舶动能。随着船舶位移增大，拦阻设施的其他单元（部分或全部）分步参与拦阻消能，以多单元协同发挥拦阻功能消耗船舶动能，拦阻力由小逐步加大，实现“软刹车”。图 C.3.3 为新型浮基分级走锚消能拦阻设施拦阻船舶示意图。

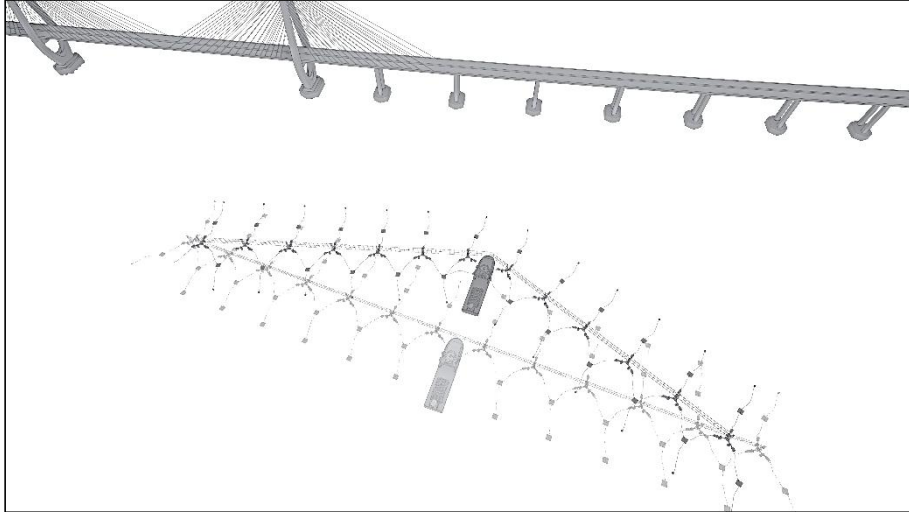


图 C.3.3 新型浮基分级走锚消能拦阻设施拦阻船舶示意图

C.3.4 防腐设计

支撑模块钢结构防腐涂装采用纳米防腐涂料技术，纳米防腐涂料采用“隔绝法”，利用纳米材料自身具有的粒径小、比表面积大的特性，配合特殊工艺制备成高致密性、高附着力的涂层，可以完全隔绝大气环境以及酸、碱、盐雾对金属及非金属物体表面的侵蚀，进而达到长效防腐的效果。锚链不进行防腐涂装，已考虑 20 年的腐蚀余量。同时，支撑模块钢结构防腐还采用了牺牲阳极保护法。

C.3.5 养护

物理拦截设施在服役期间长期处于复杂的海洋环境中，易受波浪、潮流、腐蚀等因素影响，为保障其运行可靠性与结构安全性，需建立完善的养护制度。养护工作包括日常检查、定期检查、应急检查及必要的维修与更换，具体要求如下：

C.3.5.1 日常检查

日常检查方式一般为通过视频监控系统观察和无人机巡查。通过视频监控系统隔天观察一次；采用无人机隔月巡查一次。日常检查包括以下内容：

- 1 观察一联设施整体线型是否顺直。
- 2 观察单个支撑模块是否倾斜和下沉。
- 3 观察单个拦阻网的垂度是否异常。

C.3.5.2 定期检查

定期检查分为一般性检查和特殊项检查。一般性检查为半年一次；特殊项检查从设施运营期第 5 年开始，随后 1 年一次。

- 1 一般性检查包括以下内容：
 - (1) 拦阻网与支撑架连接是否牢固。
 - (2) 支撑架有无变形，表面有无锈蚀。
 - (3) 浮式基座是否破损、漏气，表面有无锈蚀。

- (4) 相关连接件有无松动，是否锈蚀。
- (5) 浮式基座吃水是否满足设计要求。

2 特殊项检查包括以下内容：

- (1) 对拦阻网预留试验索进行抗拉试验，测定破断力。
- (2) 对牺牲阳极进行电位检测，测定电位差。
- (3) 对与浮式基座连接的锚链进行锈蚀、流蚀、磨损检查。

定期检查应乘船靠近或登上设施进行抽检，抽检对象数量不应小于总体的 10%。特殊项检查内容中，试验索需从现场取回到专门检测机构进行检测。

C.3.5.3 应急检查

防船撞柔性拦截设施被失控船舶撞击后，对受影响区段进行应急检查，检查内容与一般性检查相同。季风、台风等极端天气后，对设施进行应急检查，检查内容与一般性检查相同。

C.3.5.4 维修与更换

根据检查结果进行评估，给出相应的维修或更换方案，确保设施处于正常工作状态。维修或更换方式一般为：

- 1 构件水上维修、更换，如连接件加固或更换、锈蚀区域重新除锈喷漆等。
- 2 结构上岸维修、更换，如浮式基座上岸修复、牺牲阳极更换等。
- 3 设施的位置、形态调整，如浮式基座偏移回正、拦阻网提升拉紧等。

Morison 公式适用于细长柱状结构受波浪作用的情形，当 $D/L < 0.2$ （D：构件截面的特征尺度，L：波长）时，宜采用 Morison 公式计算。

