

指导性文件  
GD006-2026



中 国 船 级 社

# 冰区操作船体监测与辅助 决策系统指南

2026

2026年7月1日生效

北 京

# 目 录

第1节 通 则 .....	1
1.1 目的 .....	1
1.2 应用 .....	1
1.3 定义 .....	1
1.4 附加标志 .....	2
1.5 图纸和资料 .....	3
1.6 检验与试验 .....	3
1.7 船上保存的文件 .....	3
第2节 冰区操作船体监测与辅助决策系统 .....	4
2.1 一般规定 .....	4
2.2 外界信息 .....	5
2.3 数据存储 .....	5
2.4 冰区操作船体监测位置 .....	5
2.5 典型结构监测节点设计 .....	6
2.6 数据处理 .....	8
2.7 安全阈值确定 .....	9
2.8 短期监测预报 .....	10
2.9 辅助决策 .....	10
第3节 非标准冰区操作模式的补充要求 .....	12
3.1 一般规定 .....	12
3.2 冰区转弯操作 .....	12
3.3 冰区冲撞操作 .....	12
3.4 冰区尾向操作 .....	14
3.5 冰区浅水操作 .....	15
3.6 冰区斜向操作 .....	16
3.7 冰区长期驻留操作 .....	16
第4节 船体局部冰载荷监测 .....	18
4.1 一般规定 .....	18

4.2 冰载荷监测的传感器布置 .....	18
4.3 冰载荷监测的监测节点设计 .....	18
4.4 统计计算 .....	23
4.5 冰载荷监测方法 .....	23

# 第 1 节 通 则

## 1.1 目的

1.1.1 本指南旨在为冰区航行船舶的冰区操作船体监测与辅助决策系统（以下简称“监测与决策系统”）的设计、安装、使用、维护提供具体的技术指导。

1.1.2 本指南包括监测与决策系统的工况和操作流程，通过测量、记录船舶冰区操作过程中的结构响应、冰载荷，监测、评估和记录船体结构的安全状态。

1.1.3 本指南为用户提供选择监测与决策系统、设定数据测量和记录方法、确定安全阈值报警范围的技术参考，不替代船东和设备提供商对监测与决策系统的责任。

## 1.2 应用

1.2.1 监测与决策系统应具备独立启动/关闭的功能。在船舶进入冰区前，启动监测与决策系统，在船舶驶出冰区后，关闭该系统。

1.2.2 船舶在冰区操作过程中，监测与决策系统可提供冰载荷作用下船体结构响应的实时测量信息。

1.2.3 当实时测量信息接近/超过结构安全阈值时，监测与决策系统应为船舶操作提供安全预警/报警，并提供相应的操作决策建议。

1.2.4 监测与决策系统应能通过已有的测量信息预报随后的数据变化趋势。当该趋势可能接近安全阈值时，为船舶操作提供安全提示。

1.2.5 当船舶在初次冰区航行时，新安装监测与决策系统应与其他极地冰区风险指数系统（如 POLARIS）对比使用。

1.2.6 为积累冰载荷数据需要，可按第 4 节的要求在监测与决策系统中增加冰载荷反演功能。

## 1.3 定义

1.3.1 CCS《钢质海船入级规范》（以下简称“钢规”）、IMO《国际极地水域航行船舶规则》（Polar Code）、CCS《极地船舶指南》和 CCS《极地水域操作手册编写指南》的定义适用本指南。

1.3.2 **监测与决策系统**系指能够监测相关参数，并通过对比安全阈值判断结构所处的安全水平、给出辅助建议的系统。

1.3.3 **监测参数**系指能够描述船体结构响应和/或船舶运动姿态的数据。对于监测与决策系统，冰载荷作用下冰带区的局部应力是最重要的参数。

1.3.4 **安全阈值**系指按照规范强度衡准要求和被监测构件结构形式而设置的监测节点许用应力值。该值应由设计方确定，可作为冰区操作过程中辅助决策的参考，但不能替代船长在冰区操作过程中的决策和责任。

1.3.5 **评定指标**系指经数据处理后的构件实测应力与安全阈值的比值。

1.3.6 **预警**系指冰区操作船体监测位置的评定指标大于等于 0.8 时，监测与决策系统发

出预报危险的信息。

1.3.7 **报警**系指冰区操作船体监测位置的评定指标大于等于 1.0 时，监测与决策系统发出危险的信息。

1.3.8 **安全提示**系指通过监测与决策系统的预测，冰区操作船体监测位置的评定指标的变化趋势达到 1.0 时应发出安全提醒信息。

1.3.9 **冰级规范**系指 CCS 钢规第 8 篇第 13 章《极地航行船舶的补充规定》和第 2 篇第 4 章《航行冰区的加强》。

1.3.10 **标准冰区操作模式**系指冰级规范假定的操作场景，包括操作方式、冰况、航速等。

1.3.11 **非标准冰区操作模式**系指标准冰区操作模式以外的操作场景。

1.3.12 **实时**系指冰区操作过程中的实际时间。

1.3.13 **短期预报**系指短期范围内的变化预测。

#### 1.4 附加标志

1.4.1 按照本指南及相关规范要求安装监测与决策系统的船舶，可申请监测与决策系统附加标志 HMS-ICE 及适用的操作扩展附加符号，如 HMS-ICE (Turn, Glancing)。

1.4.2 按照本指南第 2 节相关要求，具备监测冰区操作过程中冰带区构件的应力，当监测值以及预报值接近或超过安全阈值时能提供相应的安全警报信息，并向船长提供修正操作建议的冰级船舶，可授予监测与决策系统附加标志 HMS-ICE。

1.4.3 按照本指南第 3 节、第 4 节相关要求，满足监测非标准冰区操作模式、冰载荷的冰级船舶，可授予相应的操作扩展附加符号。

表 1.4.3

附加符号	说明
Turn	满足船舶在冰区转弯操作过程中冰带区结构响应监测功能需求的监测与决策系统
Glancing	满足船舶在冰区冲撞操作过程中船体梁弯曲和剪切监测功能需求的监测与决策系统
Oblique	满足船舶在冰区斜向操作过程中冰带区结构响应监测功能需求的监测与决策系统
Stern-Ahead	满足船舶在冰区尾向操作过程中冰带区结构响应监测功能需求的监测与决策系统
Shallow-Water	满足船舶在冰区浅水操作过程中船底区结构响应监测功能需求的监测与决策系统
Drift	满足船舶在冰区长期驻留过程中舷侧、船底结构响应监测功能需求的监测与决策系统
Ice Load Identification	满足冰载荷监测功能需求的监测与决策系统

1.4.4 应根据批准的图纸、设备的证书和船上检验来授予 1.4.2、1.4.3 中的附加标志。

1.4.5 监测与决策系统（包括传感器）应取得 CCS 型式认可证书。

## 1.5 图纸和资料

1.5.1 包含下列信息的文件资料应提交批准：

- (1) 传感器布置图（包括各个传感器信息、监测节点安全阈值信息）；
- (2) 监测与决策系统的电力系统图。

1.5.2 下列文件资料应提交备查：

- (1) 有关软件（包括数据处理单元）的说明；
- (2) 监测与决策系统的使用手册。

## 1.6 检验与试验

1.6.1 初次检验至少应包括以下项目：

- (1) 确认相关图纸资料已审查；
- (2) 确认极地水域操作手册（PWOM）已反映监测与决策系统；
- (3) 确认系统及硬件产品（包括传感器）持有相应的证书；
- (4) 设备安装完成后，按照试验程序、监测装置的校准程序进行检验和试验，验证系统功能。

1.6.2 在进行年度检验 / 中间检验/特别检验时，应检查如下项目，确认监测与决策系统的功能运行正常：

- (1) 监测与决策系统的维护情况记录；
- (2) 监测与决策系统的总体运行情况；
- (3) 系统故障 / 失效的详细情况和原因分析；
- (4) 修理记录和备件更换情况；
- (5) 检查和确认监测与决策系统相关仪器仪表按规定的程序和计划进行了校准；
- (6) 如验船师认为有必要，典型工况下的监测数据需要进行实际验证。

1.6.3 如监测与决策系统出现故障，或者设备损坏、修理和换新，或监测手段等发生较大变化，船东或船舶管理公司应申请进行临时检验。

## 1.7 船上保存的文件

1.7.1 使用手册应保存在船上，且至少应包括下列说明：

- (1) 操作；
- (2) 传感器和系统的设定和校准；
- (3) 故障识别；
- (4) 修理；
- (5) 系统维护和功能测试（表明组件和系统的测试方法以及测试观察的内容）；
- (6) 测试结果的解释说明。

1.7.2 监测与决策系统的维护和校准日志，应保存在船上。

## 第 2 节 冰区操作船体监测与辅助决策系统

### 2.1 一般规定

2.1.1 本节为采用标准冰区操作模式的船舶安装监测与决策系统的基本要求。

2.1.2 监测与决策系统应能实时监测冰区操作过程中冰带区构件的应力，当监测值以及预报值接近或超过安全阈值时能提供相应的安全警报信息，并向船长提供修正操作的建议。

2.1.3 监测与决策系统的测量频率能满足测量冲击载荷的要求，建议不低于 150Hz，并在应变监测过程中应消除零漂现象，可采取温度补偿、定期校准和及时清理平衡等操作措施。

2.1.4 驾驶室应能实时显示冰区操作船体监测信息，包括预警、报警、安全提示和辅助决策等，为船长提供辅助决策支持。

2.1.5 监测与决策系统的工作流程参见图 2.1.5。

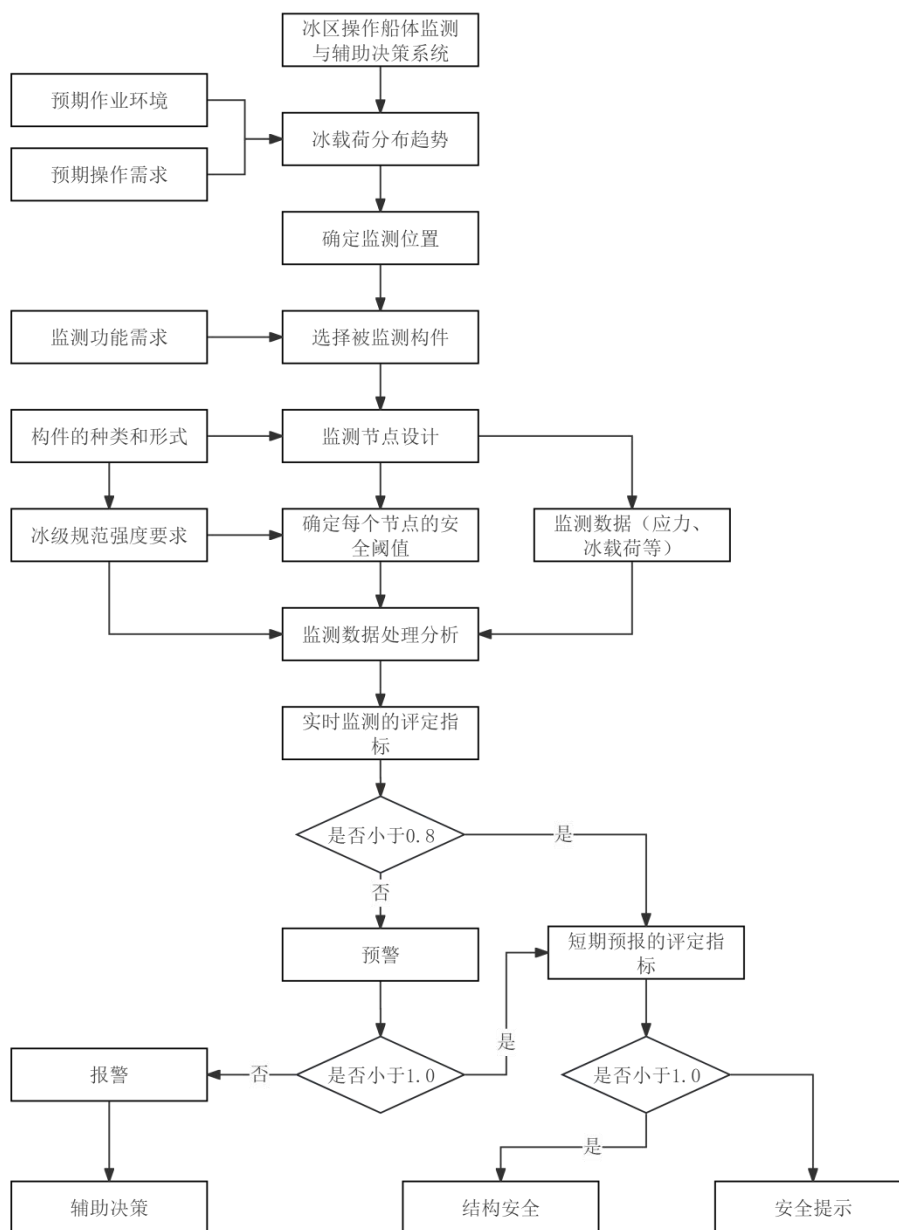


图 2.1.5 监测与决策系统的工作流程

## 2.2 外界信息

2.2.1 监测与决策系统应具备识别或获得并显示冰区环境信息的功能，诸如气温、海水温度、海冰类型<sup>1</sup>及其相应的厚度、海冰密集度等。

2.2.2 监测与决策系统应能获取船舶的状态（如浮态、速度、加速度、航向等）、航行轨迹等信息。

## 2.3 数据存储

2.3.1 系统的数据存储应满足 CCS 钢规第 8 篇第 21 章第 3 节的有关要求。

## 2.4 冰区操作船体监测位置

2.4.1 监测与决策系统主要通过在水线附近船体构件上布放应变传感器对船体结构响应进行监测。

2.4.2 应基于冰载荷分布趋势选择监测与决策系统传感器的布置位置，见图 2.4.2 和表 2.4.2。

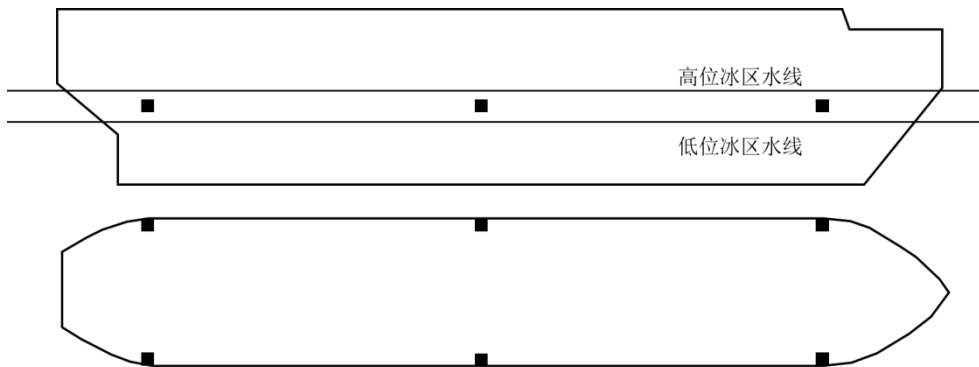


图 2.4.2 监测传感器布放位置示意图

表 2.4.2

布放区域	在高位冰区水线 UIWL 和低位冰区水线 LIWL 之间按照冰级规范中船体分区要求选择布点区域。布放位置可通过冰载荷数值预报、冰载荷模型试验、结构应力有限元分析等方法确定。
布放方式	根据不同的监测构件选择对应的传感器布放方式： (1) 腹板布放 45° 双向应变传感器或三向应变传感器； (2) 面板或折边上布放单向应变传感器； (3) 船体外板上布放三向应变传感器。
传感器类型	光纤光栅传感器或电阻应变传感器。

2.4.3 传感器布放时，一般使用短的应变传感器来测量冰激引起的结构局部应力，且应布置在应变最大的位置。

2.4.4 应按照测量拉压/弯曲正应变或剪切应变的不同功能需求，选择合适传感器安装方式，同时需考虑温度的变化对测量的影响。

<sup>1</sup> 世界气象组织（WMO）的海冰类型及厚度的定义。

## 2.5 典型结构监测节点设计

2.5.1 冰区操作船体监测典型结构节点应变（应力）监测装置应按如下原则设计：

- （1）横/纵构件的面板或折边上安装单向应变传感器测量构件弯曲所受拉/压应变（应力）；
- （2）横/纵强构件的腹板上安装双向应变传感器测量腹板所受剪切应变（应力）；
- （3）船体外板上安装三向应变传感器测量外板最大主应变（应力）；
- （4）应变传感器的设置应尽可能远离肘板趾端。

### 2.5.2 强肋骨

（1）通常应选择布放区域、承受冰冲击的强肋骨位置，单向拉压应变传感器应放置在强肋骨跨距中点的面板/折边上，双向剪切应变传感器一般应放置在横向肋骨跨距上下两端处，应变监测节点设计如图 2.5.2 所示。

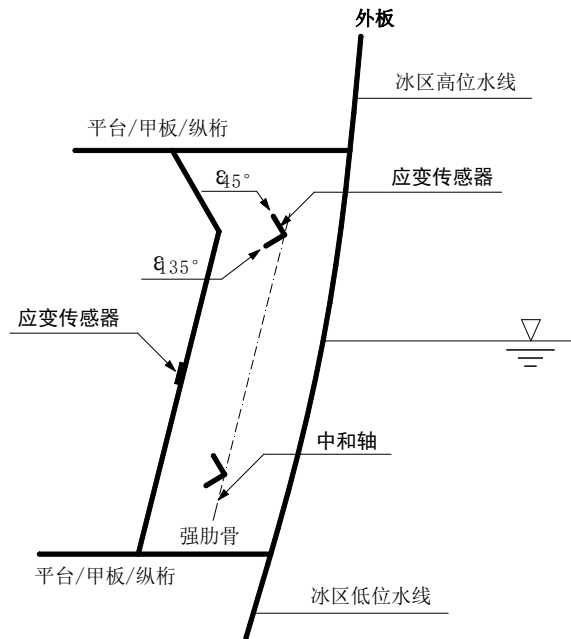


图 2.5.2 强肋骨应变监测布放示意图

（2）强肋骨的面板可采用拉压应变传感器测得的拉/压应变，监测强肋骨的面板上的拉/压应变（应力）。

（3）横向强肋骨上可采用双向剪切应变传感器监测横向强肋骨腹板所受剪应变（应力）。

### 2.5.3 纵桁

（1）通常应选择布放区域、承受冰冲击位置处的纵桁，单向拉压应变传感器应放置在纵桁跨距中点的面板上，双向剪切应变传感器一般应放置在纵向构件近强横框架附近，应变监测节点设计如图 2.5.3 所示。

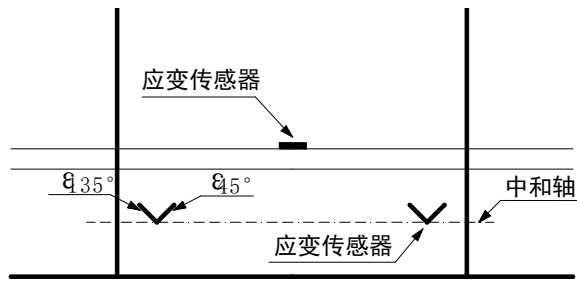


图 2.5.3 纵桁应变监测布放示意图

(2) 纵桁面板可采用拉压应变传感器测得的拉/压应变, 监测纵桁面板上的拉/压应变(应力)。

(3) 纵桁腹板上可采用双向剪切应变传感器监测纵桁所受剪应变(应力)。

#### 2.5.4 纵骨

(1) 通常应选择布放区域、承受冰冲击位置处的纵骨, 单向拉压应变传感器应放置在纵骨跨距中点的面板上, 监测节点设计如图 2.5.4 所示。

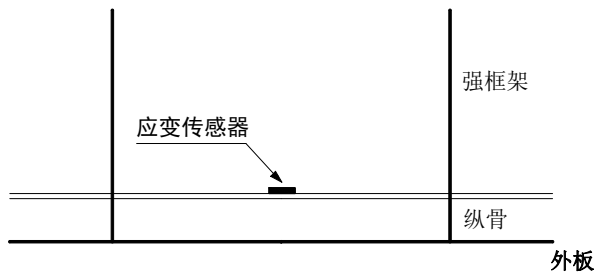


图 2.5.4 纵骨应变监测布放示意图

(2) 纵骨的面板可采用拉压应变传感器测得的拉/压应变, 监测纵骨的面板上的拉/压应变(应力)。

#### 2.5.5 肋骨

(1) 通常应选择布放区域、承受冰冲击位置处的肋骨位置, 单向拉压应变传感器应放置在肋骨跨距中点的面板上, 监测节点设计如图 2.4.5 所示。

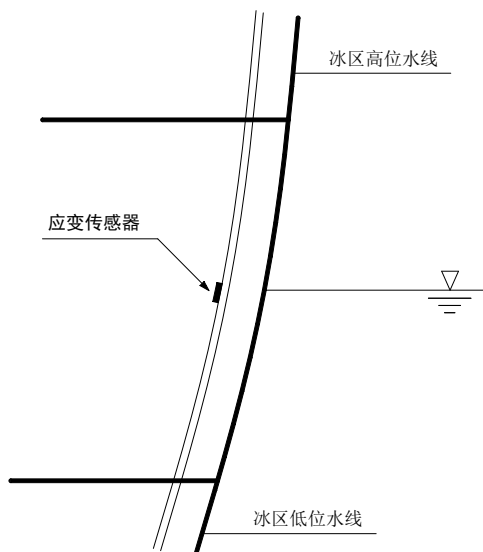


图 2.5.5 肋骨应变监测布放示意图

(2) 肋骨的面板可采用拉压应变传感器测得的拉/压应变，监测肋骨的面板上的拉/压应变（应力）。

### 2.5.6 船体外板

(1) 通常应选择布放区域、承受冰冲击位置处的舷侧外板，三向应变传感器应放置在船体外板板格的中心处，应变监测节点设计如图 2.5.6 所示。

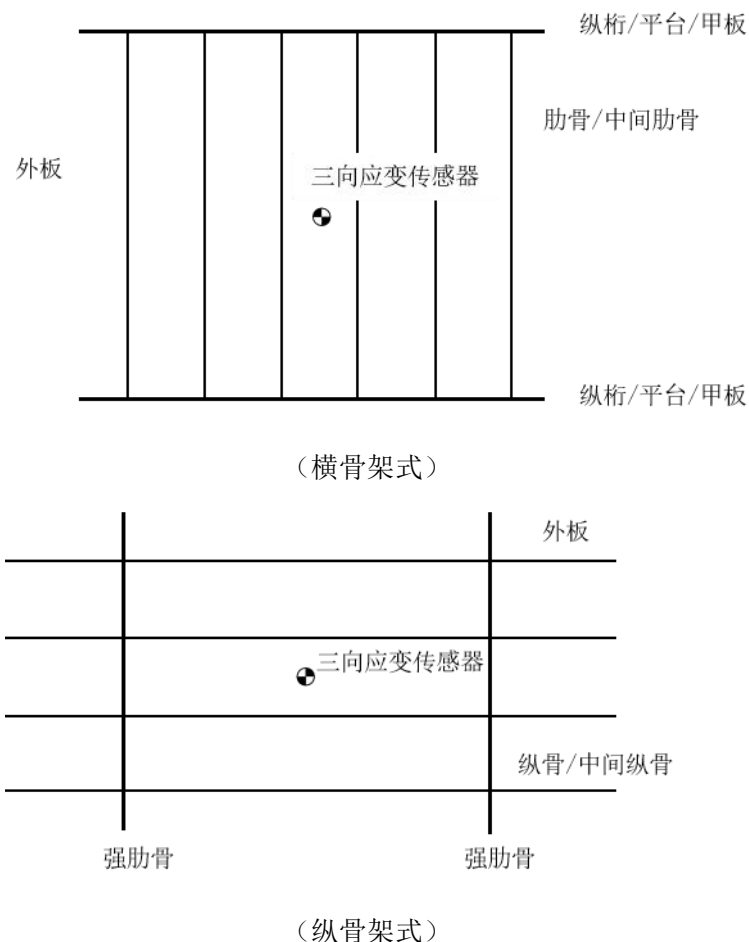


图 2.5.6 船体外板应变监测布放示意图

(2) 船体外板可采用三向应变传感器测得的板格应变，监测外板的最大主应变（应力）。

## 2.6 数据处理

2.6.1 采集的数据要经过低通滤波处理，滤除高频噪声引入的测量误差。

2.6.2 由于冰载荷分布的随机性及冰区环境的恶劣，采集的数据中出现异常值的概率增大，数据处理时应剔除远离其他数据样本值的异常值。

2.6.3 采集到的冰区操作船体监测数据经过低通滤波、剔除异常值等处理得到实测应力值，可作为评定指标的输入。

2.6.4 应采取必要措施消除环境温度对监测数据的影响，比如设置温度补偿装置或采用计及环境温度变化的算法。

2.6.5 当传感器失效时，系统应提示并剔除失效测点的影响，同时显示故障位置。

## 2.7 安全阈值确定

2.7.1 监测与决策系统专门用于监测冰载荷作用下船体结构的响应。该系统启动时，船体监测位置的初始值应自动预设为零。

2.7.2 在监测与决策系统中，安全阈值由测点位置、构件属性和许用应力等因素共同确定，用于评定构件安全状态的标准。

2.7.3 按照冰级规范要求推导冰载荷作用下被测构件的许用应力，见 CCS 钢规第 2 篇第 4 章或第 8 篇第 13 章第 2 节的相关规定或其他等效方法。

2.7.4 对于 PC 冰级的船舶，冰载荷作用下被测构件的许用应力见表 2.7.4。

表 2.7.4

构件		许用应力	
外板	横骨架式 $\Omega \geq 70^\circ$	$\frac{1}{2(1+\frac{s}{2b})^2} R_{eH}$	
	纵骨架式 $\Omega \geq 20^\circ$	$\frac{1}{2(1+\frac{s}{2l})^2} R_{eH}$	
	纵骨架式 $\Omega < 20^\circ$	$\frac{2\frac{b}{s} - (\frac{b}{s})^2}{2(1+\frac{s}{2l})^2} R_{eH}$	
骨材	纵骨	弯曲应力	$A_4 R_{eH}$
		剪应力	$\frac{R_{eH}}{2\sqrt{3}}$
	肋骨	弯曲应力	$YA_1 R_{eH}$
		剪应力	$\frac{R_{eH}}{2\sqrt{3}}$
强构件	强肋骨	采用直接计算确定	
	纵桁	采用直接计算确定	
总纵强度	屈服/屈曲	$\sigma_a - \frac{\bar{M}_s}{W_c} \times 10^3$	
	剪切	$\tau_a$	

注：表中  $\Omega$ 、 $s$ 、 $b$ 、 $Y$ 、 $A_1$ 、 $A_4$ 、 $R_{eH}$ 、 $\sigma_a$ 、 $\tau_a$  的定义见 CCS 钢规第 8 篇第 13 章第 2 节， $\bar{M}_s$ 、 $W_c$  的定义见 CCS 钢规第 2 篇第 2 章第 2 节。

2.7.5 对于 B3~B1\*系列冰级的船舶，冰载荷作用下构件的许用应力见表 2.7.5。

表 2.7.5

构件		许用应力	
外板	纵骨架式	$\frac{0.889}{f_2} R_{eH}$	
	横骨架式	$0.667 f_1 R_{eH}$	
骨材	纵骨	弯曲应力	$\frac{8 f_4}{m} R_{eH}$
		剪应力	$\frac{f_4 f_5}{2\sqrt{3}} R_{eH}$
	肋骨	弯曲应力	$\frac{4}{m_t} R_{eH}$
		剪应力	$\frac{f_3}{2\sqrt{3}} R_{eH}$
强构件	强肋骨	采用直接计算确定	
	纵桁	采用直接计算确定	

注：表中  $f_2$ 、 $f_1$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 、 $f_5$ 、 $R_{eH}$ 、 $m_t$ 、 $m$  的定义见 CCS 钢规第 2 篇第 4 章第 2 节。

2.7.6 以构件的最大实测应力与安全阈值的比值作为评定指标，评定指标大于等于 1.0 时，应设置报警，大于等于 0.8 时，应设置预警。

2.7.7 如系统具有冰载荷监测功能，以监测冰载荷与结构极限承载能力的比值作为评定指标，评定指标大于等于 1.0 时，应设置报警，大于等于 0.8 时，应设置预警。

## 2.8 短期监测预报

2.8.1 监测与决策系统应具备短期监测预报功能，基于已有监测数据反映未来 1~2 小时内监测数据的变化趋势（如极值预报、趋势曲线等）。当预报的评定指标达到 1.0 时，应设置安全提示。

## 2.9 辅助决策

2.9.1 应根据冰区环境、船舶状态和预警/报警信息，给出辅助决策以支持船长选择合适的操作措施。

2.9.2 当船舶在冰区操作时，对应不同位置处的预警/报警信息，应实施相应的操作措施，通常情况下，见表 2.9.2。

表 2.9.2

预警/报警位置	可能的危险	操作措施
首部	首部结构损坏； 船首部纵桁、肋板等结构失效。	建议降低航速、调整航向或停止操作。
中部	舷侧外板损坏； 舷侧纵桁、肋骨等失效。	建议降低航速或增大转弯半径。
尾部	尾柱结构破坏； 船尾部纵桁、肋板等结构失效。	建议降低航速。

## 第3节 非标准冰区操作模式的补充要求

### 3.1 一般规定

3.1.1 船舶冰区操作对船舶结构强度有影响，如有非标准冰区操作模式的功能需求，建议根据冰区操作的特点，在第2节的基础上，再考虑本节的相关要求。

3.1.2 根据选择的非标准冰区操作模式，在对应船体局部结构布放传感器，对冰激船体结构响应进行实时监测和预报，分析相应结构的安全状态。

3.1.3 可通过试验和数值分析方法确定非标准冰区操作时船体的冰载荷分布趋势，确定传感器的布放位置。

3.1.4 结构监测节点的设计可参照本指南第2节2.4的相关要求。

### 3.2 冰区转弯操作

3.2.1 具有较高冰区操作性能的船舶（如具有高升力舵、具有吊舱式推进系统），为满足冰区转弯操作时冰区操作船体监测的需要，建议按3.2.2要求设置额外的船体监测装置。

3.2.2 转弯操作时，行进方向前部靠航道内侧以及行进方向后部靠航道外侧冰压力最大，同时，由于受到大量海冰的挤压作用，船中的冰压力也较大，因此，冰区操作船体监测位置应在本指南第2节的基础上，在靠近型线收缩的肩部和尾部结构关键部位的左右舷至少各增加设置1个冰区操作监测位置。

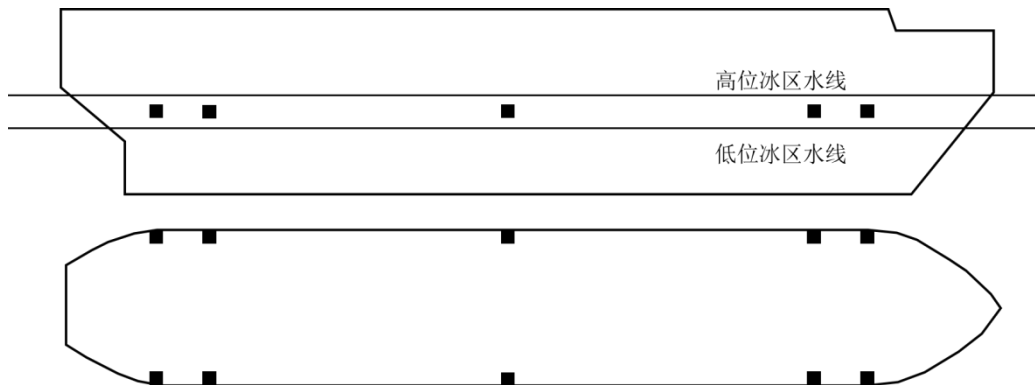


图 3.2.2 监测传感器布放位置示意图

3.2.3 当发生预警或报警时，应能提出修正船舶操作的建议：

(1) 船舶在冰区进行转弯操作时，应注意船体肩部和尾部的冰区操作船体监测情况，如出现预警/报警时，可降速慢行或增大转弯半径。

(2) 对于使用全回转推进器的高冰级船舶，在严重冰况下，为避免船体冰载荷过大，建议采用倒车低速转弯。通过全回转推进器将冰吹离船体，拓宽航道，利于转弯。如采用正车高速转弯，建议全回转推进器角度控制在  $30^\circ$  以内。

### 3.3 冰区冲撞操作

3.3.1 考虑船舶可能在冰区采取冲撞操作模式（如冲撞冰脊），为满足冲撞操作时冰区操作船体监测的需要，建议按3.3.2要求设置额外的船体监测装置。

3.3.2 冲撞操作时，船首至船肩船舶结构型线收缩处的冲击冰载荷较大，且首部可能出现较大的冰载荷附加冲击弯矩和剪力，因此，冰区操作船体监测位置应满足如下要求：

(1) 应在首部至船舶结构型线收缩处之间结构关键部位左右舷至少各设置 1 个船体监测位置，在船舶结构型线收缩处至少各设置 1 个船体监测位置。

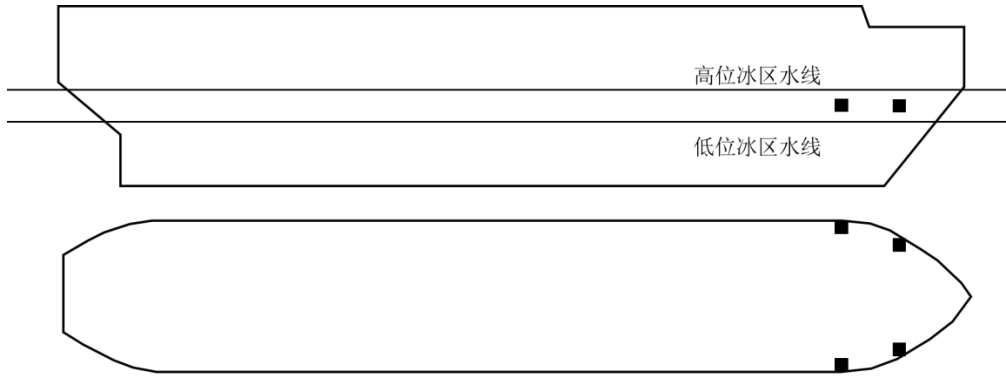


图 3.3.2(1) 监测传感器布放位置示意图

(2) 应在首部外板的关键部位至少设置 1 个船体梁剪切应变（应力）监测位置，监测方式为图 3.3.2(2)所示，通过安装双向 45° 的应变传感器得到船体梁受到的剪切应变（应力）。

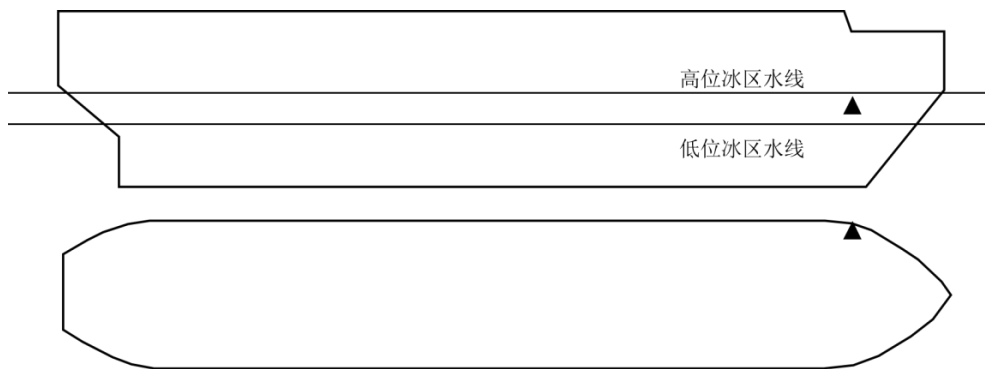


图 3.3.2(2) 监测传感器布放位置示意图

(3) 应在距离尾部 0.5L~0.7L 位置的典型横剖面关键部位至少设置 1 个船体梁弯矩监测位置。为减小测量误差，视实际情况可沿船宽方向等间距布置多个应变（应力）监测位置，取测量平均值。

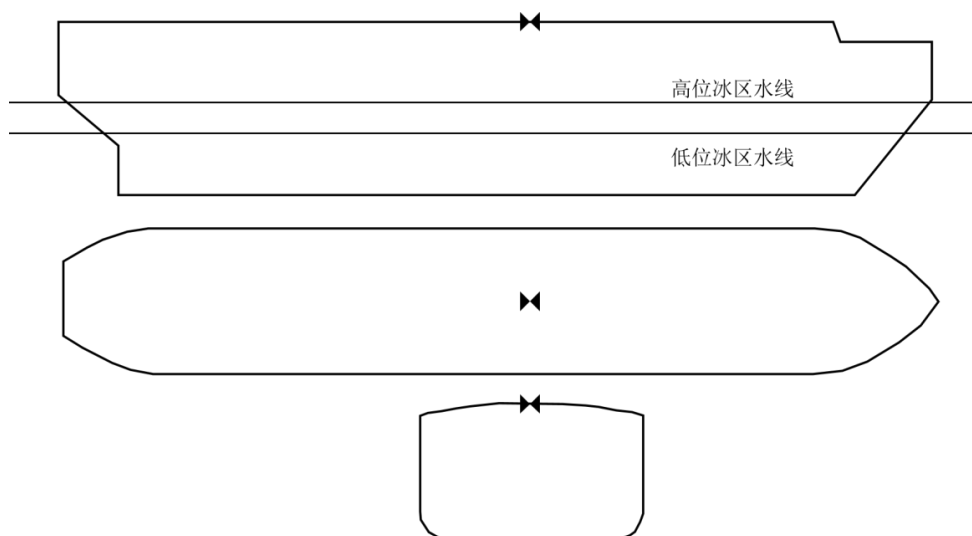


图 3.3.2(3) 监测传感器布放位置示意图

(4) 应在首部船体板上设置 1 个三向应变（应力）监测位置，测量船体外板所受的最大主应变（应力）。

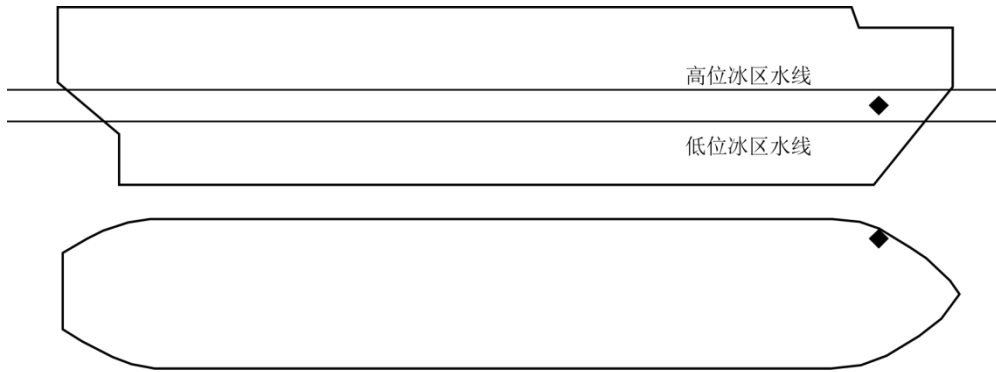


图 3.3.2(4) 监测传感器布放位置示意图

3.3.3 当发生预警或报警时，应能提出修正船舶操作的建议：

(1) 当年冰冲撞操作时，如冲撞冰厚度大于设计冰厚，连续冲撞的速度应低于设计冰区航速，单次冲撞速度最大为设计冰区航速。

(2) 多年冰冲撞操作时，冲撞操作使用船首撞击，且冲撞速度为低速。

(3) 冲撞冰脊时，只准使用船首冲撞，冲撞速度不得高于设计冰区航速。

(4) 撞击极端冰障碍时存在冰困风险，应谨慎实施撞击操作。

(5) 当船体监测数据接近或达到安全阈值时，应降低冲撞速度或停止冲撞。

#### 3.4 冰区尾向操作

3.4.1 船舶可能在冰区采取尾向操作模式（如冰区渡轮、冰区双向作业型船舶等），为满足尾向操作时冰区操作船体监测的需要，建议按 3.4.2 要求设置额外的冰区操作船体监测装置。

3.4.2 尾向操作时，船尾水线附近船舶结构冰载荷较大，尤其是结构型线变化较大处的冰压力最大，因此，冰区操作船体监测位置应满足如下要求：

(1) 应在船舶尾部、尾部过渡区的关键部位左右舷至少各设置 1 个船体监测位置。

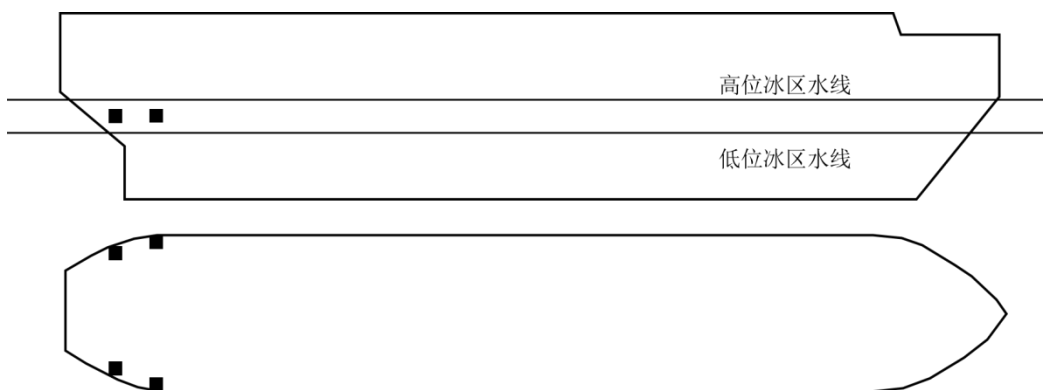


图 3.4.2(1) 监测传感器布放位置示意图

(2) 应在尾部船体外板上至少设置 1 个三向应变（应力）监测位置，测量船体外板所受最大主应变（应力）。

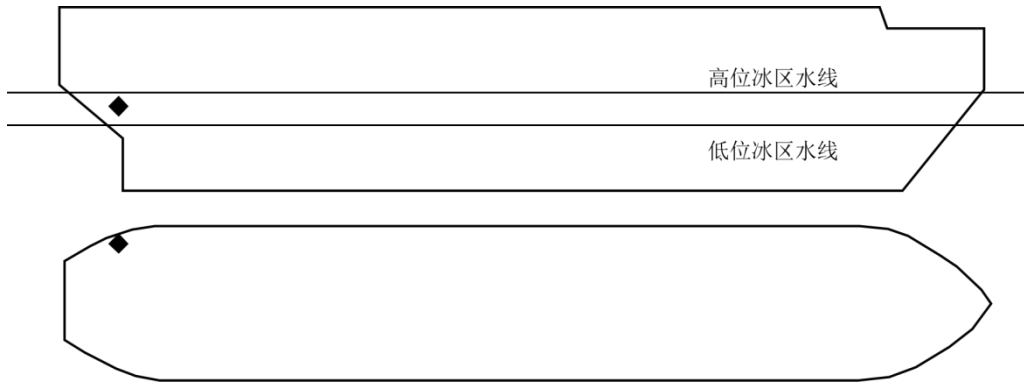


图 3.4.2(2) 监测传感器布放位置示意图

3.4.3 当发生预警或报警时，应能提出修正船舶操作的建议：

- (1) 尾部应尽可能保持合适的螺旋桨浸没，防止桨叶直接撞冰发生损坏。
- (2) 在较厚的冰区（冰脊，厚碎冰）中尾向操作时，可采取低航速和吊舱连续旋转，提高排冰效率。

### 3.5 冰区浅水操作

3.5.1 船舶可能在冰区浅水操作（如浅水航道、港区操作等），为满足冰区浅水操作时冰区操作船体监测的需要，建议按 3.5.2 要求设置额外的冰区操作船体监测装置。

3.5.2 冰区浅水操作时，底部区容易承受冰块的撞击，冰区操作船体监测位置应满足如下要求：

- (1) 在船首、船尾的底部区的关键部位左右舷至少各设置 1 个船体监测位置；
- (2) 应通过试验或数值方法分析冰区浅水操作时船体的冰载荷/结构应力分布，以确定船体监测具体位置和数量。

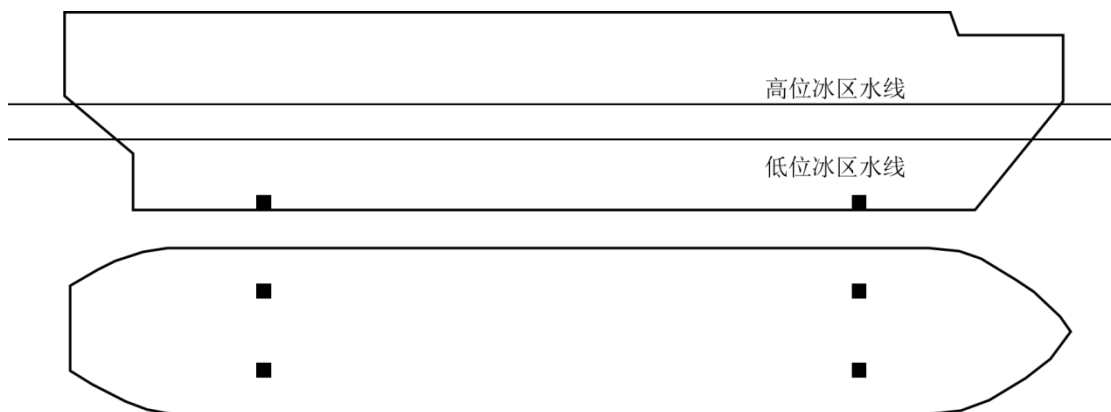


图 3.5.2 监测传感器布放位置示意图

3.5.3 当发生预警或报警时，应能提出调整船舶操作的建议：

- (1) 应关注底部冰区操作船体监测情况，如冰区操作船体监测数据出现预警/报警，应采取降低航速、调整航向等操作，必要时应停止前进。
- (2) 当船舶遇到严重冰况时，应加强瞭望，必要时可绕航避让或从松散冰处的下风缘慢车进入。

### 3.6 冰区斜向操作

3.6.1 对于采用冰区斜向操作的专用破冰船，为满足冰区斜向操作时冰区操作船体监测的需要，建议按 3.6.2 要求设置额外的船体监测装置。

3.6.2 冰区斜向操作时，船-冰作用形式与常规冰区作业有较大差异，船体梁弯矩、船舶舷侧部位剪力明显增大，因此，船体监测位置应满足如下要求：

(1) 船体斜向破冰位置处的船体外板上至少设置 2 个三向应变（应力）监测位置，测量船体外板所受最大主应变（应力）。

(2) 应通过试验或数值方法分析冰区斜向操作时船体的冰载荷分布，选择冰载荷较大区域的船体结构关键部位设置足够数量的船体监测位置。

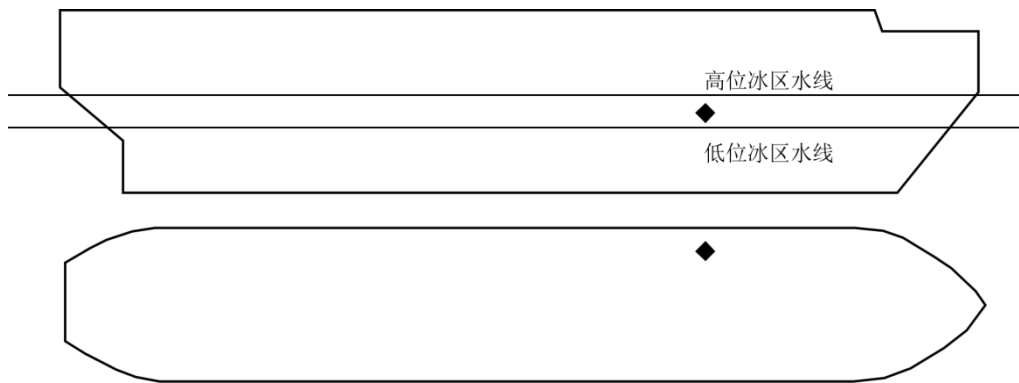


图 3.6.2 监测传感器布放位置示意图

3.6.3 当发生预警或报警时，应能提出调整船舶操作的建议：

(1) 斜向操作可以加大破冰宽度，提高破冰效率，但只能用于冰层厚度较薄的区域，如遇厚冰层或冰脊时，应立即停止斜向操作。

(2) 斜向操作时，应调整吃水至设计水线附近，以尽量低的航速推进。

### 3.7 冰区长期驻留操作

3.7.1 对于冰区长期驻留的船舶，为满足冰区驻留时冰区操作船体监测的需要，建议按 3.7.2 要求设置额外的冰区操作船体监测装置。

3.7.2 冰区长期驻留时，船舶两舷受海冰挤压，船底部受堆积海冰挤压，因此，冰区操作船体监测位置应满足如下要求：

(1) 船中区域两舷沿高位冰区水线（UIWL）、低位冰区水线（LIWL）至少各设置 4 个监测位置。

(2) 在至少 2 个船中区域横剖面上，高位冰区水线以上两舷至少设置 1 个监测位置，低位冰区水线以下两舷至少设置 3 个监测位置。

(3) 在至少 2 个船中区域横剖面上，船底一侧至少设置 3 个监测位置。

(4) 应通过试验或数值方法分析冰区长期驻留时船体的冰载荷/结构应力分布，以确定船体监测具体位置和数量。

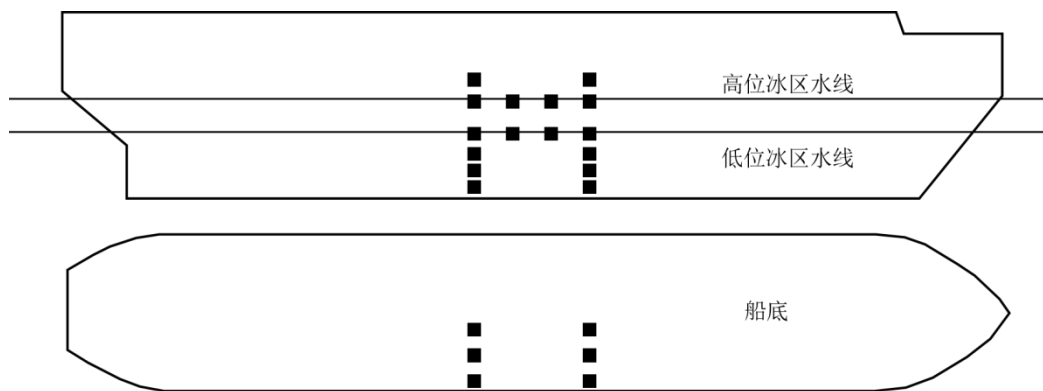


图 3.7.2 监测传感器布放位置示意图

## 第4节 船体局部冰载荷监测

### 4.1 一般规定

4.1.1 冰载荷监测是冰区操作船舶结构损伤识别、安全评估和冰载荷研究的重要技术手段。冰载荷监测应满足本节要求。

4.1.2 冰载荷可以通过测得船体结构响应获得。

4.1.3 冰载荷监测过程中,可假定局部应变响应仅为平衡外载荷静力效应而产生的变形,忽略动力效果所激发的局部区域高频应变响应。

### 4.2 冰载荷监测的传感器布置

4.2.1 为满足冰载荷监测的功能需求,应在水线附近布置阵列式应变传感器,对识别冰载荷所需的结构响应进行监测。

4.2.2 阵列式应变传感器应处于高位冰区水线(UIWL)和低位冰区水线(LIWL)之间,且具有足够的监测面积。通常建议纵向范围取不小于4倍骨材间距或1倍强框架间距的大者,垂向范围不小于4倍骨材间距。

4.2.3 对于船体不同部位处的阵列式应变传感器,应根据不同冰载荷监测目标确定合适的传感器布置方案,典型的传感器布置方案见表4.2.3。

表 4.2.3

部位	冰载荷监测目标	布置位置	备注
首部	首向破冰时首部或首部过渡区的冰载荷	肋骨/纵骨, 强肋骨/纵桁的腹板	推荐设置
		船体外板	可选
中部	冰区长期驻留时两舷海冰挤压载荷	肋骨/纵骨, 强肋骨/纵桁的腹板	推荐设置
	冰区航行时层冰边缘的碰擦载荷	船体外板	可选
尾部	尾向破冰时尾部或过渡区的冰载荷	肋骨/纵骨, 强肋骨/纵桁的腹板	推荐设置
		船体外板	可选

4.2.4 为达到冰载荷的监测精度,阵列式应变传感器应具有足够的数量,通常建议不小于 $5 \times 5$ 的监测矩阵或数量相当的监测矩阵。

### 4.3 冰载荷监测的监测节点设计

#### 4.3.1 强肋骨

(1) 布放区域通常应选择承受冰冲击位置处的强肋骨,可以选择在中和轴上布放双向应变传感器测量强肋骨的剪应变,应变监测节点设计如图4.3.1(1)所示。根据实际情况也可在靠近外板的强肋骨腹板上设置单向拉压应变传感器,应变监测节点设计如图4.3.1(2)所示。

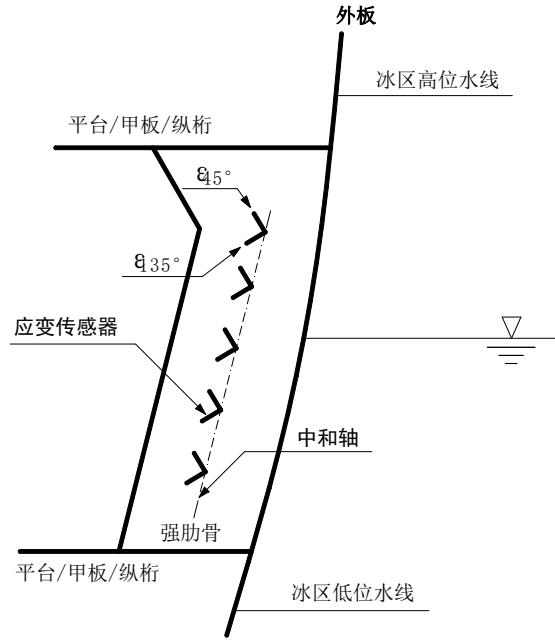


图 4.3.1 (1) 冰载荷监测强肋骨双向应变传感器布放示意图

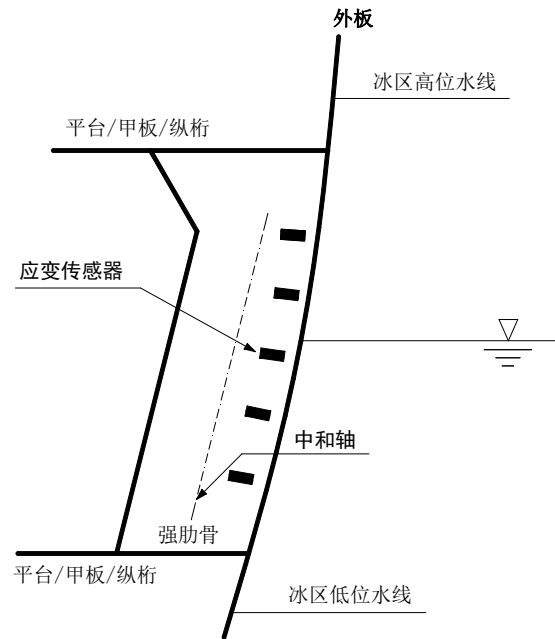


图 4.3.1 (2) 冰载荷监测强肋骨单向应变传感器布放示意图

(2) 采用单向应变传感器直接测量得到垂直于外板方向的正应变。采用双向应变传感器时，可采用下式计算构件所受正应变  $\epsilon_y$  和剪切应变  $\gamma_{xy}$ 。

$$\epsilon_y = \epsilon_{135^\circ} + \epsilon_{45^\circ}$$

$$\gamma_{xy} = \epsilon_{135^\circ} - \epsilon_{45^\circ}$$

式中： $\epsilon_{45^\circ}$ ——为  $45^\circ$  拉压应变传感器测量的应变值；

$\varepsilon_{135^\circ}$ ——为  $135^\circ$ 拉压应变传感器测量的应变值。

#### 4.3.2 纵桁

(1) 布放区域通常应选择承受冰冲击位置处的纵桁，可以选择在中和轴上布放双向应变传感器测量纵桁的剪应变，应变监测节点设计如图 4.3.2 (1) 所示。根据实际情况也可在靠近外板的纵桁腹板上设置单向拉压应变传感器，应变监测节点设计如图 4.3.2 (2) 所示。

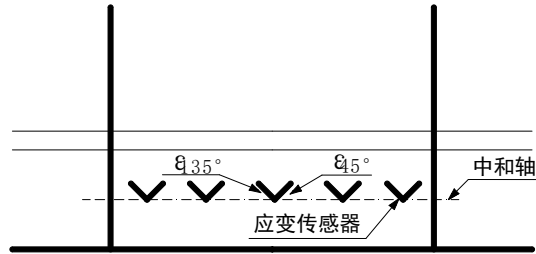


图 4.3.2 (1) 冰载荷监测纵桁双向应变传感器布放示意图

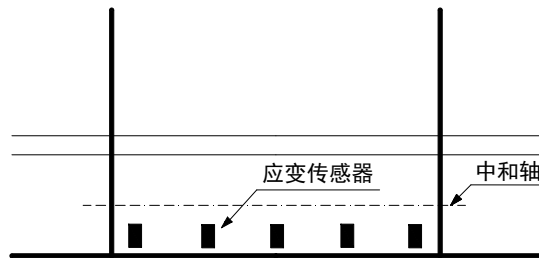


图 4.3.2 (2) 冰载荷监测纵桁单向应变传感器布放示意图

(2) 采用单向应变传感器直接测量得到垂直于外板方向的正应变。采用双向应变传感器时，可采用 4.3.1 (2) 计算构件所受正应变  $\varepsilon_y$  和剪切应变  $\gamma_{xy}$ 。

#### 4.3.3 肋骨

(1) 布放区域通常应选择承受冰冲击位置处的肋骨，在中和轴上布放双向应变传感器测量肋骨的剪应变，应变监测节点设计如图 4.3.3 (1) 所示。根据实际情况也可在靠近外板的肋骨腹板上设置单向拉压应变传感器，应变监测节点设计如图 4.3.3 (2) 所示。

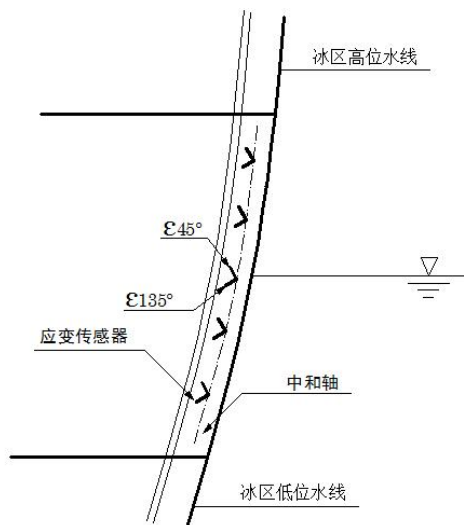


图 4.3.3 (1) 冰载荷监测肋骨双向应变传感器布放示意图

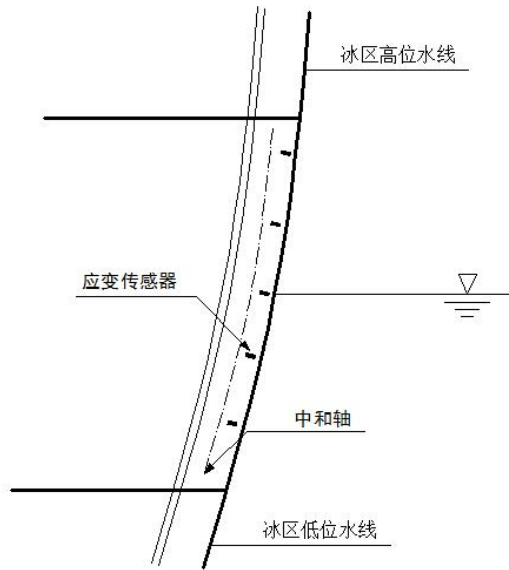


图 4.3.3 (2) 冰载荷监测肋骨单向应变传感器布放示意图

(2) 采用单向应变传感器直接测量垂直于外板方向的正应变。采用双向应变传感器时，可采用 4.3.1 (2) 计算构件所受正应变  $\epsilon_y$  和剪切应变  $\gamma_{xy}$ 。

#### 4.3.4 纵骨

(1) 布放区域通常应选择承受冰冲击位置处的纵骨，在中和轴上布放双向应变传感器测量纵骨的剪应变，应变监测节点设计如图 4.3.4 (1) 所示。根据实际情况也可在靠近外板的纵骨腹板上设置单向拉压应变传感器，应变监测节点设计如图 4.3.4 (2) 所示。

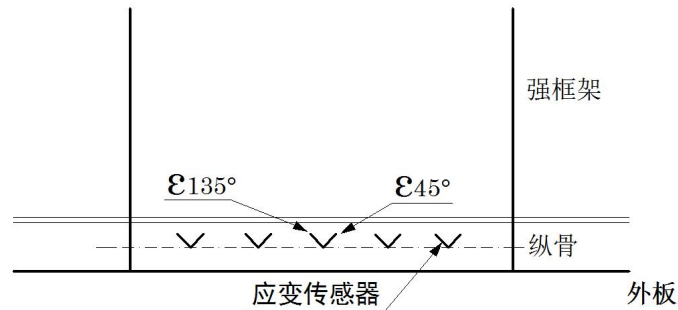


图 4.3.4 (1) 冰载荷监测纵骨双向应变传感器布放示意图

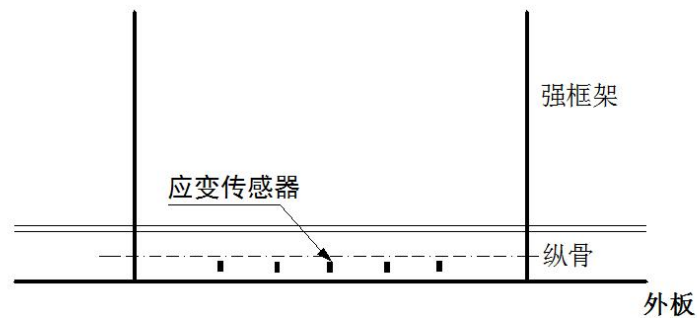


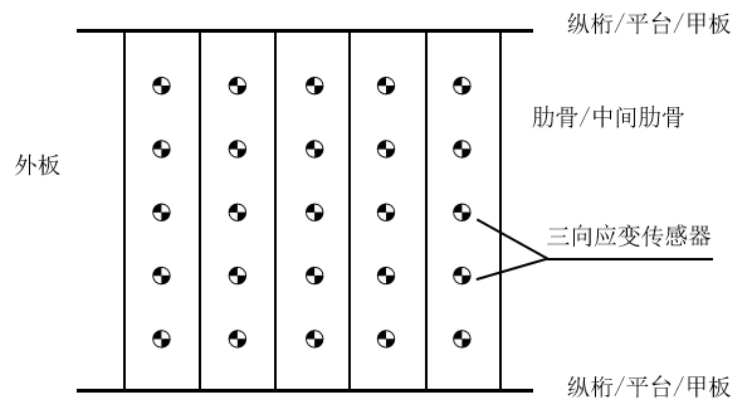
图 4.3.4 (2) 冰载荷监测纵骨单向应变传感器布放示意图

(2) 采用单向应变传感器直接测量得到垂直于外板方向的正应变。采用双向应变传感

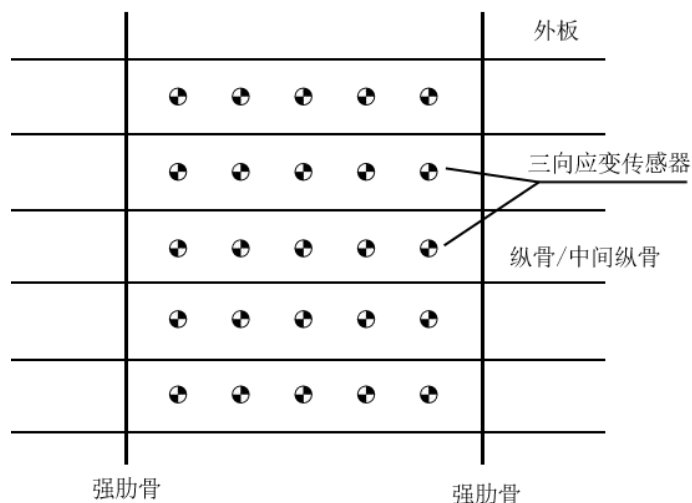
器时，可采用 4.3.1 (2) 计算构件所受正应变  $\varepsilon_y$  和剪切应变  $\gamma_{xy}$ 。

#### 4.3.5 船体外板

(1) 对于船体外板设置三向应变传感器，应变监测节点设计如图 4.3.5 (1) 所示。



a. 横骨架式



b. 纵骨架式

图 4.3.5 (1) 冰载荷监测船体外板应变传感器布放示意图

(2) 通过应变传感器直接测量拉压应变，计算得到最大主应变，1 个三向应变传感器布放如图 4.3.5 (2) 所示，由此可确定最大主应变。

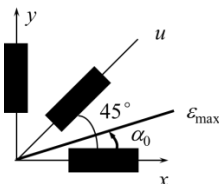


图 4.3.5 (2) 1 个三向应变传感器布放示意图

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2} \left[ (\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \sqrt{2 [ (\varepsilon_x - \varepsilon_u)^2 + (\varepsilon_u - \varepsilon_y)^2 ]} \right]$$

其中， $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_u$ ——为三轴应变花在  $xoy$  平面上  $x$ 、 $y$ 、 $u$  三个方向的线应变；

$\varepsilon_{\max}$  ——为最大主应变。

注：根据实际情况也可安装三个应变传感器之间夹角为  $60^\circ$  或  $120^\circ$  的应变花。

#### 4.4 统计计算

4.4.1 冰载荷监测应计算下列统计参数：

- (1) 最大值；
- (2) 最小值；
- (3) 平均值；
- (4) 标准偏差。

4.4.2 每个应力响应应按时间顺序建立所有峰值的柱状图。每个响应的振幅应被划分成预先设定的时间间隔（可在软件中配置），在每个时间间隔内对峰值数量进行计数。

4.4.3 基于对在 4.4.1、4.4.2 中获得参数的统计分布的假设，应对在给定的时间内超过规定值的概率曲线进行评估。

4.4.4 基于概率曲线，确定找出超过预定阈值的概率。

#### 4.5 冰载荷监测方法

4.5.1 冰载荷监测可采用影响系数矩阵法。如采用其他方法，应证明其方法的有效性和准确性。

4.5.2 在冰载荷作用的某一时刻，局部结构的响应可用静力方程描述：

$$\begin{matrix} [K] \\ m \times m \end{matrix} \begin{matrix} \{\varepsilon(t)\} \\ m \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} \{p(t)\} \\ m \times 1 \end{matrix}$$

则其应变可表示为：

$$\begin{matrix} \{\varepsilon(t)\} \\ m \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} [K]^{-1} \\ m \times m \end{matrix} \begin{matrix} \{p(t)\} \\ m \times 1 \end{matrix} = \begin{matrix} [\delta] \\ m \times m \end{matrix} \begin{matrix} \{p(t)\} \\ m \times 1 \end{matrix}$$

式中： $\begin{matrix} [K] \\ m \times m \end{matrix}$  ——应变与冰载荷转换的应变刚度矩阵，即影响系数矩阵；

$\begin{matrix} \{\varepsilon(t)\} \\ m \times 1 \end{matrix}$  ——该时刻结构的应变响应矢量；

$\begin{matrix} \{p(t)\} \\ m \times 1 \end{matrix}$  ——该时刻冰载荷矢量；

$\begin{matrix} [\delta] \\ m \times m \end{matrix}$  ——为应变柔度矩阵，即影响系数矩阵的逆矩阵；

$m$  ——测量传感器的数目。

4.5.3 船体冰区操作船体监测结构的应变刚度矩阵  $[K]$  可通过有限元或者模型试验方法确定。计算流程如下：

当仅在第  $n$  号测点处施加单位载荷时，由有限元或者模型试验可获得对应的应变响应矢量。由 4.5.2 式可知：

$$\begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1n} & \cdots & \delta_{1m} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2n} & \cdots & \delta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \cdots & \delta_{nn} & \cdots & \delta_{nm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{m1} & \delta_{m2} & \cdots & \delta_{mn} & \cdots & \delta_{mm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \delta_{1n} \\ \delta_{2n} \\ \vdots \\ \delta_{nn} \\ \vdots \\ \delta_{mn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{Bmatrix}$$

此时的应变响应矢量即为应变柔度矩阵的第  $n$  列。同理，对每一测点进行相同操作后即可得到矩阵  $[\delta]$ ，通过对应变柔度矩阵求逆从而得到应变刚度矩阵  $[K]$ 。

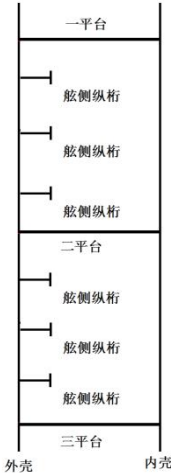
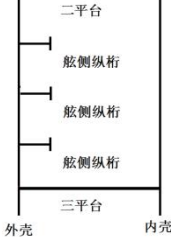
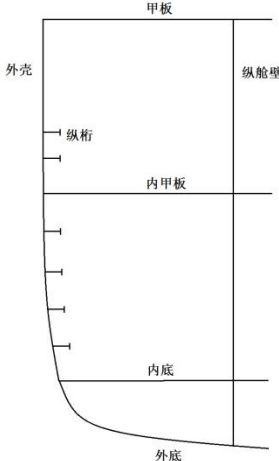
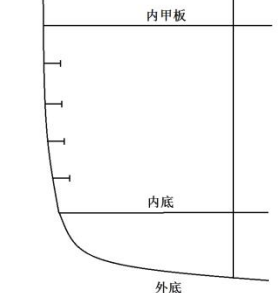
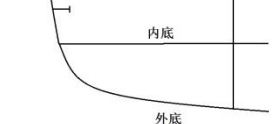
4.5.4 通过有限元方法确定应变刚度矩阵  $[K]$  时，应尽可能消除边界条件、载荷加载的影响。

(1) 模型范围应包括：

纵向范围可取为  $1/2+3+1/2$  强框架间距，且不低于 2 倍载荷板长度  $w$ （见 CCS 钢规第 8 篇第 13 章第 2 节的相关规定）；

横向范围和垂向范围，见表 4.5.4（1）。

表 4.5.4（1）局部模型的横向和垂向范围

结构形式		横向范围	垂向范围
双舷侧结构		冰带舷侧纵桁处于两平台中间位置	内外壳间距
		当冰带舷侧纵桁接近某一平台	内外壳间距
单舷侧结构		冰带舷侧纵桁处于甲板与内甲板的中间位置	外壳至纵舱壁
		冰带舷侧纵桁处于内甲板与内底的中间位置	外壳至纵舱壁
		当冰带舷侧纵桁接近内甲板	外壳至纵舱壁

(2) 有限元的单元选择和网格划分应遵循 CCS 钢规第 2 篇第 1 章第 5 节的相关要求。

对于测点布置区域的结构网格尺寸采用 50x50mm。典型的局部模型见 4.5.4 (2)。

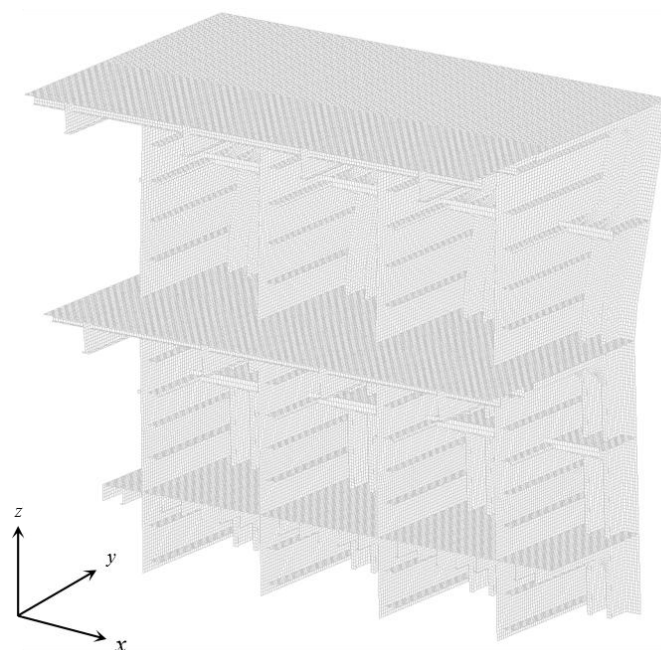


图 4.5.4 (2) 局部结构有限元模型

(3) 有限元模型的坐标系取右手坐标系，即

- x 方向为沿船长方向，以向船首方向为正；
- y 方向为沿船宽方向，以向左舷方向为正；
- z 方向为沿船体垂向，以基线向上为正。

(4) 模型采用结构总建造厚度/实际厚度。

(5) 边界约束条件应能模拟冰载荷作用下局部结构的变形特征，见表 4.5.4 (5) (a) 和表 4.5.4 (5) (b)。

表 4.5.4 (5) (a) 双舷侧局部模型约束边界条件

位置	线位移约束			角位移约束		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
上下端面	固定	固定	固定	—	固定	固定
前后端面	固定	—	—	—	固定	固定

表 4.5.4 (5) (b) 单舷侧局部模型约束边界条件

位置	线位移约束			角位移约束		
	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
上下端面	固定	固定	固定	—	固定	固定
前后端面	固定	—	—	—	固定	固定
内甲板边缘	—	固定	—	—	—	—