

指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD03-2020



中国船级社

大型海工结构物运输和浮托安装 分析指南

2020

生效日期：2020 年 3 月 1 日

北京

目 录

第 1 章 通 则	1
第 1 节 一般规定.....	1
第 2 节 定义与缩略语.....	1
第 2 章 设计环境条件	2
第 1 节 一般规定.....	2
第 2 节 气象限制性作业.....	2
第 3 节 非气象限制性作业.....	2
第 3 章 装船分析	3
第 1 节 一般规定.....	3
第 2 节 分析准则.....	3
第 3 节 结构物强度分析.....	3
第 4 节 系泊分析.....	3
第 5 节 其他要求.....	4
第 4 章 海上运输分析	5
第 1 节 一般规定.....	5
第 2 节 环境条件.....	5
第 3 节 稳性分析.....	7
第 4 节 运动响应.....	9
第 5 节 驳船总纵强度分析.....	10
第 6 节 运输结构分析.....	10
第 7 节 其他要求.....	11
第 5 章 导管架滑移下水分析	12
第 1 节 一般规定.....	12
第 2 节 分析准则.....	12
第 3 节 下水动力分析.....	13
第 4 节 下水结构分析.....	13
第 6 章 导管架扶正分析	15
第 1 节 一般规定.....	15
第 2 节 分析准则.....	15
第 3 节 扶正分析.....	16
第 4 节 结构分析.....	17
第 7 章 组块浮托安装分析	18
第 1 节 一般规定.....	18
第 2 节 环境条件.....	18
第 3 节 气候窗口分析.....	19
第 4 节 驳船稳性和总纵强度分析.....	19
第 5 节 系泊分析.....	20
第 6 节 对接分析.....	21
第 7 节 进船和退船分析.....	23
第 8 节 计算结果处理.....	24
第 9 节 结构分析.....	25
附 录	26

第 1 节 导管架下水分析流程和示例	26
第 2 节 导管架扶正分析示例	31
第 3 节 浮托安装的气候窗口分析示例	33

第1章 通 则

第1节 一般规定

1.1.1 本指南是中国船级社（以下简称“CCS”）为大型海工结构物（大型固定平台的上部组块、导管架结构）装船、运输和浮托安装分析提供技术服务的指导性文件。

1.1.2 本指南明确了大型海工结构物在进行装船分析、海上运输分析、导管架滑移下水分析、导管架扶正分析和组块浮托安装分析时的技术要求。

1.1.3 本指南参考或引用了以下规范/标准：

- (1) 中华人民共和国国家经济贸易委员会，海上固定平台安全规则；
- (2) CCS，海上拖航指南；
- (3) CCS，钢质海船入级规范 第2分册-船体；
- (4) IMO Intact Stability Code，IMO Intact Stability Code；
- (5) DNVGL-ST-N001，Marine Operation and Marine Warranty；
- (6) API RP 2A-WSD，Recommended Practice for Planning，Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design；
- (7) API RP 2SK，Design and Analysis of Station keeping Systems for Floating Structures。

第2节 定义与缩略语

1.2.1 定义

除另有规定外，本指南有关定义如下：

(1) 对接单元（Leg Mating Units），简称LMU，系指上部组块和导管架之间的连接单元，也是耦合分析需要关注的关键部位；

(2) 组块支撑单元（Deck Support Units），简称DSU，系指上部组块和支撑框架之间的接触单元。DSU内部一般装置缓冲件或吸收、减轻冲击能量的沙盘。当上部组块即将完成载荷转移时，DSU内的缓冲件开始发挥作用，以缓解上部组块与支撑框架之间的碰撞；

(3) 组块支撑框架（Deck Support Frame），简称DSF，系指上部组块在建造场地或在驳船上的支撑结构；

(4) 护舷（FENDER），系指安装在导管架或者驳船舷侧，为减缓船舶与导管架之间碰撞的装置，同时也对船的横/纵向运动有所限制。

1.2.2 缩略语

本指南的缩略语含义见表1.2.2。

缩略语含义

表 1.2.2

缩略语	含义
MSL	平均海平面（Mean Sea Level）
RAO	幅值响应算子（Response Amplitude Operator）
GMT	横稳性高（Transverse Metacentric Height）
GML	纵稳性高（Longitinal Metacentric Height）
MPME	最可能极大值（Most Probable Maximum Extreme）

第2章 设计环境条件

第1节 一般规定

2.1.1 本章给出了海上作业（安装）设计环境条件选取的一般标准。

2.1.2 设计环境条件应根据海上操作基准时长选取，海上操作基准时长包括计划时间和应急时间。

2.1.3 海上作业根据操作基准时长的不同分为气象限制性作业和非气象限制性作业。

2.1.4 海上作业环境条件要素包括但不限于风、波浪、流、潮汐等。

2.1.5 海上运输和浮托安装的设计环境条件选取原则分别在4.2节和7.2节中给出。

第2节 气象限制性作业

2.2.1 操作基准时长在72小时以内的海上作业可定义为气象性限制作业。

2.2.2 若能在48小时内进入合适遮蔽点或有足够的移动速度以躲避预报有恶劣天气的区域，操作基准时长大于72小时的作业也可划分为气象限制性作业。

2.2.3 对于气象限制性作业，在拥有足够气候窗口和可靠气象预报的前提下，设计环境条件的选取可独立于极值统计数据。

第3节 非气象限制性作业

2.3.1 除2.2节提到的情况外，操作基准时长大于72小时的海上作业一般定义为非气象限制性作业。

2.3.2 对于非气象限制性作业，可参考以下环境极值统计数据作为设计环境条件。

非气象限制性作业的环境条件推荐极值

表 2.3.2

操作基准时长	风	浪和流
基准时长≤3天	5年一遇月极值	3个月一遇月极值
3天<基准时长≤7天	10年一遇月极值	1年一遇月极值
7天<基准时长≤1个月	25年一遇月极值	10年一遇月极值
1个月<基准时长≤1年	75年一遇月极值	50年一遇月极值
基准时长>1年	100年一遇月极值	100年一遇月极值

第3章 装船分析

第1节 一般规定

3.1.1 大型海工结构物一般采用整体拖拉装船。本章适用于大型导管架和组块的拖拉装船分析。

3.1.2 装船分析包括：稳性分析、驳船总纵强度分析、装船调载能力分析、结构物强度分析；若装船作业时长超过 72 小时，还需进行系泊分析。

3.1.3 装船作业一般在 72 小时内完成，属于气象限制性作业，可根据可靠气象预报选取设计环境条件。

第2节 分析准则

3.2.1 稳性

(1) 初稳性高一般要求大于 1.0 m，任何情况下不得小于 0.3 m；

(2) 装船期间船舶的最小干舷为 0.5 m 加上作业期间的预期最大波高的 50%。

3.2.2 总纵强度

(1) 装船过程中，压载和载荷转移引起船体重量分布发生变化，需进行总纵强度校核；

(2) 工程中一般将静水弯矩/剪切力与其许用值进行比较，判断其总纵强度是否满足要求，并采用在港作业的许用值。

3.2.3 装船调载能力

(1) 调载能力指的是船舶压排载泵的能力，并根据现场操作情况和事故应对措施等考虑一定的冗余能力；

(2) 调载能力与货物重量、潮汐情况、装船时间密切相关。即在装船时间窗口内，调载能力既能满足装船过程中调节浮态的要求，也能在潮汐变化时调整船的吃水以保持驳船上滑道与码头滑道的平齐。

第3节 结构物强度分析

3.3.1 装船结构分析中，结构物和码头（船）之间的支撑用只可压缩单元模拟，当结构物某些支撑节点与码头（或船）之间间隙增大时，该节点失去支撑而不受力。

3.3.2 拖拉装船时由于潮汐和波浪的作用，码头与驳船上的滑道上端存在一定的高度差，被拖结构物在强度校核时需考虑装船过程中船的垂向运动引起的对齐误差。工程中通常考虑驳船有 $\pm 20\sim 25$ mm 的升沉运动。

3.3.3 结构分析需考虑结构物被拖于不同位置的工况，并考虑上述误差。

3.3.4 杆件和节点应力应根据相关规范进行校核。

第4节 系泊分析

3.4.1 若装船操作时长超过 72 小时，则系泊缆强度应满足表 7.5.2 的要求，系泊分析需考虑完整工况和单根系泊缆破损工况。

3.4.2 系缆桩、系柱、导缆器及其基座结构上的最大计算载荷应不小于最大系泊张力，其安全系数不应小于系泊缆完整状态下的强度安全系数。安全系数可按以下公式计算：

$$\text{安全系数} = \text{额定安全工作载荷} / \text{最大计算载荷}$$

3.4.3 若与码头之间的系泊力由绞车制动器控制，则绞车制动器的承载力应超过最大系泊缆张力（包括完整和破损工况）的 1.2 倍。

第 5 节 其他要求

3.5.1 导管架或组块的拖拉装船时间是决定装船是否可行的重要因素。组块装船时间一般小于 5 小时，即要求码头潮位能满足连续可操作时间超过 5 小时的要求。而导管架装船时间与导管架长度有关，一般小于 10 小时。

3.5.2 装船过程中，船底的泥面间隙一般要求大于 1.0 m。

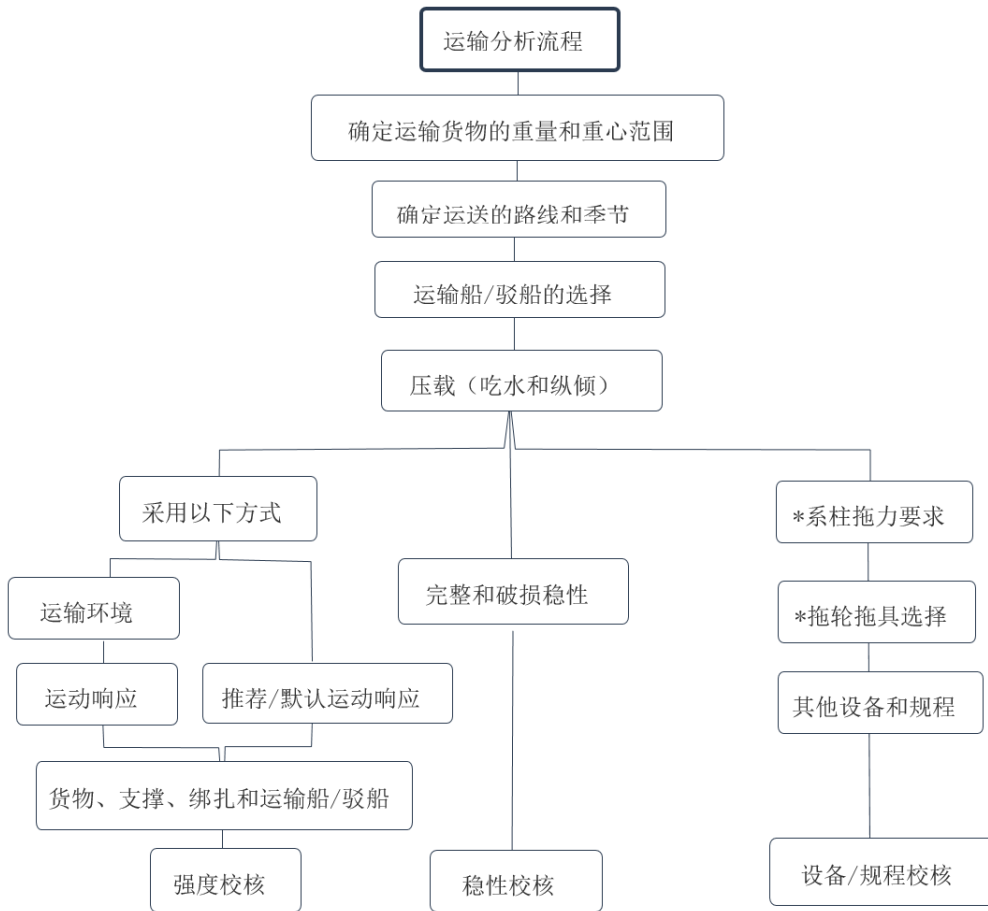
第 4 章 海上运输分析

第 1 节 一般规定

4.1.1 本章适用于导管架和上部组块的运输分析，其他海工结构物的运输分析可作为参考。

4.1.2 海上运输分析包括：稳性分析、运输船/驳船总纵强度分析、运动响应分析、结构物强度分析。

4.1.3 典型海上运输设计分析流程如图 4.1.3 所示。



注：图中*表示在拖航时考虑

图4.1.3 典型海上运输分析流程图

第 2 节 环境条件

4.2.1 海上运输的设计环境条件应选择非台风期，环境要素主要考虑波浪和风。

4.2.2 如无有义波高对应的周期数据时，可参考如下公式确定谱峰周期的范围：

$$\frac{\sqrt{13H_s}}{1 + \frac{V \cos(\theta)}{1.56\sqrt{13H_s}}} \leq T_p \leq \frac{\sqrt{30H_s}}{1 + \frac{V \cos(\theta)}{1.56\sqrt{30H_s}}}$$

式中： H_s ——有义波高，m；

T_p ——谱峰周期，s；

V ——航行速度，m/s；

θ ——航行方向（ 0° 为迎浪， 180° 为随浪），deg。

4.2.3 通常情况下，船舶在极限海况条件下的航速很低或者为零，波浪参数可考虑有义波高和一系列谱峰周期的组合。

4.2.4 对于时间为 30 天（或更长）的远洋运输，设计环境条件一般采用十年一遇月极值。

4.2.5 对于少于 30 天的海上运输作业，设计环境条件采用十年一遇月极值较为保守，可根据暴露于恶劣海况的时间进行调整。当调整后的 10% 风险水平的极值小于一年一遇月极值时，应采用一年一遇月极值作为设计的最小值。

4.2.6 调整极值的计算方法：特定航线区域的风速或者有义波高不超过某个值的概率可以表示为累计概率分布，如 Weibull 分布。对于波浪，运输作业在约 3 小时（风为 1 小时）内遇到的有义波高（或风速）小于某个值 x 的概率由 $FX(x)$ 给出。若穿越航线区域需要 M 小时（暴露于恶劣海况的时间），并假设连续波高和风速事件是独立的，则不超过值 x 的概率可用 $[FX(x)]^N$ 给出，式中 $N=M/T$ ，对于风 $T=1$ 小时，波浪 $T=3$ 小时。则在该特定航线区域（平均每 10 次运输）遭遇风速或者有义波高达到或者超过设计极值的概率为 0.1。即按照 $1-[FX(x)]^N=0.1$ ，可计算出航行/拖航十次运输的极值。这个值也被称为运输作业调整后的极值，风险水平为 10%。该方法也可得到更低风险水平的极值（如 1% 或 5%）。

4.2.7 确定暴露于恶劣海况的时间应考虑以下因素：

(1) 运输作业的最初 48 小时可假定为由可靠起航气象条件预报，这段时间可排除在外；

(2) 根据航线上各区域的月平均波高调整航速；计算各航线区域平均海况对航速的影响时，平静气象条件下的航速应乘以下系数：

$$F = 1 - (H_m/b)^2$$

式中： b ——可导致运输完全停止的波高，m；对于驳船通常为 5 m，其它船舶为 8 m；

H_m ——该航线区域的月平均波高，m。

(3) 若航线区域存在海流，则应考虑平均海流对于运输速度的影响，即按运输方向进行矢量分解；

(4) 通常考虑最少暴露时间为 3 天。

4.2.8 环境条件降低

(1) 环境条件降低是指在航行过程中由于驳船有能力在极限海况下迎浪或随浪航行，从而可在分析时考虑其它方向上有义波高的适当降低。环境条件降低后各个浪向上有义波高可参见表 4.2.7。

(2) 考虑环境条件放松时，驳船舶必须为具有冗余推进系统的自航船舶。即：

① 至少两个独立主机；

② 至少两套独立燃油供给系统；

③ 至少两套独立电力传输系统；

④ 至少两个独立配电板；

⑤ 至少两套独立操舵系统，或者有一种对单操舵系统的其它方式（不包括不能从舰桥操作的应急操舵系统）；

⑥ 假设任意一个推进器失效后，考虑货物的风载，驳船仍具有在设计风暴条件下维持预期航向的能力。

不同浪向下对海况的降低要求

表 4.2.8

浪向 (迎浪为 0°)	有义波高 (占设计值的百分比)
0° ~ ± 30°	100%
± (30° ~ 60°)	100%与 80%之间线性插值
± 60°	80%
± (60° ~ 90°)	80%与 60%之间线性插值
± 90°	60%
± (90° ~ 120°)	60%与 80%之间线性插值
± 120°	80%
± (120° ~ 150°)	80%与 100%之间线性插值
± (150° ~ 180°)	100%

第 3 节 稳性分析

4.3.1 完整稳性衡准

(1) 稳性消失角不得小于表 4.3.1 给出的数值。若离港和到港状态或任何中间状态之间存在较大的差别, 如吃水和压载变化等, 则应考虑最危险的情况;

稳性消失角

表 4.3.1

驳船或被拖物	总长 L (m)	型宽 B (m)	稳性消失角 (°)
大型和中型自航船舶	L ≥ 76, 且 B ≥ 23		36
大型驳船	L ≥ 76, 且 B ≥ 23		36
小型驳船	L < 76, 且 B < 23		40
小型自航船舶	L < 76, 且 B < 23		44
内陆和遮蔽水域 (冰层覆盖区域之内)	-		36
内陆和遮蔽水域 (冰层覆盖区域之外)	-		24

(2) 作为替代方法, 若拖航或航行的最大运动幅值可用模型试验或运动响应分析得出, 则稳性消失角应不小于:

$$20 + (15/GM) + \theta$$

式中: GM —— 稳性高, m;

θ —— 横摇(纵摇)最大幅值, 考虑波浪诱导运动和设计风速导致的静风横倾或纵倾, deg。

(3) 初稳性高一般要求大于 1.0 m, 任何情况下均不得小于 0.3 m。稳性高的计算须考虑自由液面的影响;

(4) 回复力臂曲线与风倾力臂曲线至第二交点或进水角处的两曲线所包围的面积之比应不小于 1.4, 即 $A + B \geq 1.4(B + C)$ (见图 4.3.1);

(5) 用于风倾力臂计算的设计风速: 无限航区可取 100 kn, 近海航区取 70 kn, 沿海航区取 60 kn, 遮蔽航区取 50 kn;

(6) 如欲在稳性计算中计及货物悬空部分的浮力，则要求在 15 m/s 的风速作用下悬空部分不能入水。

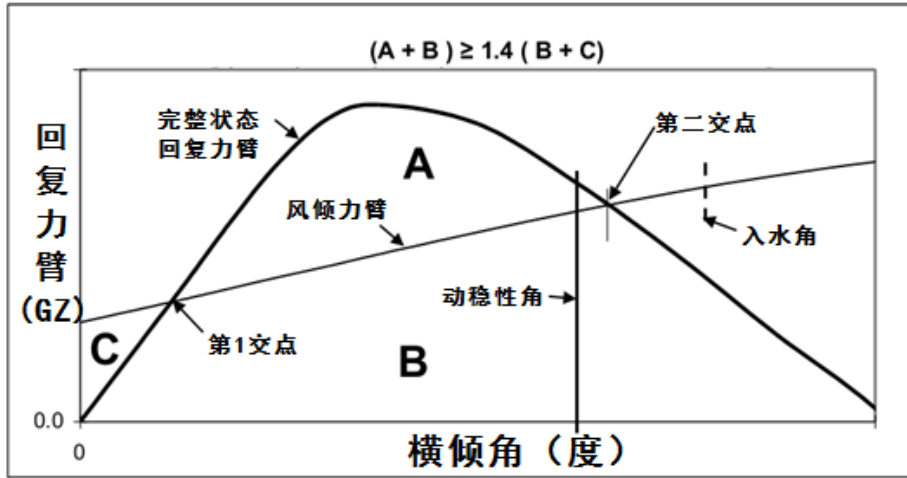


图4.3.1 典型完整状态静水力曲线图

4.3.2 破损稳性衡准

(1) 在从水平贯入有效水密舱壁至船体内为 1.5 m 深的情况下，稳性高均能保持正值，并且假定：

① 在破损舱室内，所有破损范围内的管系和通风系统都应假定浸水。能够提供措施以防止其他预定为完整的舱室继续浸水；

② 垂向范围从基线向上无限制；

③ 在水平破损范围内，两个水密舱壁之间或者它们近前的阶梯式的位置之间的距离不应小于 3 m。如果小于 3 m，则临近的舱室也要假定破损；

④ 如果比①或者③两条所列的破损范围还小的破损导致更坏的结果，则应该考虑此较小的破损范围。

(2) 在任何方向的风力作用下，破损后的船体仍应具备足够的储备稳性，即破损后在风力作用下的水线应低于可能导致发生继续进水的任何开口的下缘（第 1 交点角小于入水角）（参见图 4.3.2）。

(3) 在计算风倾力臂时，取 50 kn 或者用于计算完整稳性时的风速这二者之中的较小值；

(4) 如果在完整稳性中考虑了悬空部分的浮力，则在破损稳性计算中也应该考虑这部分发生破损的情况；

(5) 对于 B 型及更大干舷的驳船，破损稳性的计算则需要采用 SOLAS 概率法进行计算。

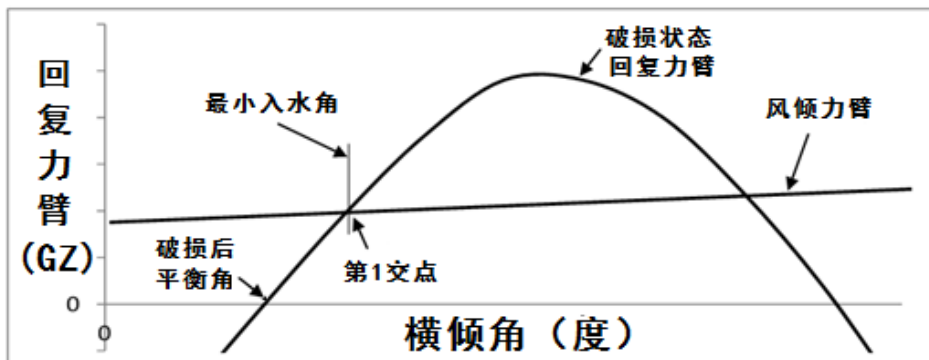


图4.3.2 典型破损状态静水力曲线图

4.3.3 吃水和纵倾

(1) 对于自航船舶，吃水通常为设计吃水；对于驳船拖航，吃水通常在船体型深的35%~60%之间，且一般明显低于载重线吃水；对于具有载重线证书的自航船和驳船，吃水不可超过载重线吃水；

(2) 对于驳船和大型被拖物，吃水和纵倾的选择应尽可能减少艏部砰击，提供良好的航向控制并考虑拖航拉力造成的艏倾；

(3) 若驳船艏部是流线型设计并且安装了定向稳定导流尾鳍，需控制纵倾；

(4) 拖航条件下最小吃水和纵倾的推荐值见表 4.3.3。

最小吃水和纵倾推荐值

表 4.3.3

被拖船长度 (m)	船艏最小吃水 (m)	最小艏倾 (m)
30	1.0	0.3
60	1.7	0.6
90	2.4	0.8
120	3.1	1.0
150	3.7	1.2
≥200	4.0	1.5

第 4 节 运动响应

4.4.1 运动响应是进行绑扎方案设计和结构完整性校核的基础；可通过水动力分析、模型试验或使用默认/推荐运动值得到运动响应设计值。

4.4.2 采用水动力分析方法获取运动响应时，应注意：

(1) 设计海况的确定可参考 4.2 节，小于设计波高并处于船舶横摇和/或纵摇固有周期的波高也应考虑。至少应考虑以 45° 为间隔的 0° ~180° 浪向下的船舶运动响应分析；

(2) 通常不允许利用自由液面修正来降低稳性高度以增加横摇固有周期，任何降低稳性高度的影响应在稳性计算中予以考虑；

(3) 水动力分析方法基于二维切片理论/三维势流理论进行水动力计算得到运动 RAO，然后通过统计预报得到最可能极值。

4.4.3 若有可靠（通过审查）的模型试验结果，则可利用模型试验得出运动响应。应考虑模型试验的比例效应，一般将试验值增加 10% 或一个相互认可的值。

4.4.4 如果既没有进行运动响应分析，也没有模型试验结果，根据标准建造并且满足良好航海程序时，可以接受以下标准，如表 4.4.4 所示。

缺省的运动响应标准表

表 4.4.4

运输类型	工况	L (m)	B (m)	L/B	方形系数	循环周期 (s)	单振幅 (°)		垂荡
							横摇	纵摇	
非气象限制	1	>140 且 >30	-	<0.9	10	20	10	0.2g	
	2	>76 且 >23	-	任意	10	20	12.5	0.2g	
	3	≤76 或 ≤23	≥2.5	<0.9	10	30	15	0.2g	
	4			≥0.9		25			
	5	≤76 或 ≤23	<2.5	<0.9	10	30	30	0.2g	
	6			≥0.9		25			25
非温和水域的气象限制	7	任意	≥2.5	任意	10	10	5	0.1g	

性作业，持续时间<24 小时（对于 L/B<1.4，使用非气象限制工况）	8	任意	<2.5， ≥1.4	任意	10	10	10	0.1g
温和水域的气象限制性作业（对于 L/B<1.4，使用非气象限制工况）	9	任意	≥2.5	任意	10	5	2.5	0.1g
	10	任意	<2.5， ≥1.4	任意	10	5	5	0.1g
内陆和遮蔽水域运输（对于 L/B<1.4，使用非气象限制工况）	11	任意	≥1.4	任意	静态	在两个方向形成等效的 0.1g 加速度		0.1g

注：表中 L 表示水线长度，B 表示最大水线宽度。

4.4.5 风载引起的运动

- (1) 除考虑波浪诱导运动外，还需考虑风载引起的运动；
- (2) 风载对运动的贡献主要体现在：风引起的风倾角对横摇（或纵摇）的增加，以及横摇（或纵摇）产生的重力加速度的分量，即横向（纵向）加速度的增加；
- (3) 计算风载引起的运动通常采用一分钟阵风，并保守认为风引起横摇（或纵摇）运动和波浪诱导运动的线性叠加；
- (4) 一般情况下，风引起的运动只是很小的一部分。在稳性较好而受风面积不大的情况下，如不便计算风倾角，则可在波浪引起的最大运动响应的基础上，增加 2%~3% 作为设计运动参数。

第 5 节 驳船总纵强度分析

4.5.1 驳船的总纵强度的校核方法包括规范校核法、直接计算法、规则波计算法和许用强度法。

4.5.2 规范校核法指参考 CCS《钢质海船入级规范》第 2 篇第 2 章进行总纵强度校核。

4.5.3 直接计算法基于三维绕/辐射势流理论，计算作用在船体上的水动力，获取波浪诱导的船体剖面剪力/弯矩的传递函数。然后根据海况条件，采用谱分析方法对驳船遭受的载荷进行预报。由于运输过程一般较长，需基于运输海域的波浪散布图进行长期统计预报。

4.5.4 规则波计算法指用最大设计规则波计算驳船所承受的波浪弯矩和剪切力。规则波的波长取船长，规则波的位置可沿船的长度方向选取若干个，以期得到最恶劣的载荷工况。

4.5.5 采用许用强度法只需校核静水状态的总纵强度。总纵强度的许用范围，可分为在港作业和航行状态两种工况。

第 6 节 运输结构分析

4.6.1 一般要求

- (1) 货物（导管架和组块）必须有足够的强度以承受惯性载荷和风载荷，以及外伸出船舶所导致的额外载荷（参见 4.7.1）；
- (2) 绑扎件必须设计为能够承受运输过程中的外载荷，以及航行中驳船的变形（主要为纵向弯曲所致）；
- (3) 在绑扎件/支撑结构的设计中，若计算得到的设计载荷小于表 4.6.1 中的“最小绑扎力”，则必须使用表中的数值。

最小绑扎力

表 4.6.1

方向	运输货物重量 W (ton)						
	<100	100≤W <1000	1000≤W <5000	5000≤W <10000	10000≤W <20000	20000≤W <40000	≥40000
所需最小绑扎力*W							
横向	10%	10%	10%	10%	10%	注①	5%
纵向	5%	5%	5%	5%	注②	注③	1.5%

注：① 对于 $20000 \leq W < 40000$ 吨，取 $(15 - W/4000) \%$ ；

② 对于 $10000 \leq W < 20000$ 吨，所需的纵向最小绑扎力必须不低于 $(7.5 - W/4000) \%$ ；

③ 对于 $20000 \leq W < 40000$ 吨，所需的纵向最小绑扎力必须不低于 $(3.5 - W/20000) \%$ 。

4.6.2 载荷工况

- (1) 载荷工况须考虑各航向下风和浪引起的波动性载荷及静载荷的叠加；
- (2) 静载荷包括重力以及恒定风作用下产生的风载和风倾角效应；
- (3) 波动性载荷主要考虑波浪引起的惯性力，应通过 4.4 节提到的方法得到运输结构物的加速度；
- (4) 采用水动力分析得到船舶 6 个自由度加速度时，需考虑各浪向下载荷工况的组合；
- (5) 采用缺省的运动响应标准值计算时，考虑垂荡、横摇和纵摇的正负值组合，共 8 个工况。

4.6.3 强度校核

结构应力应根据相关规范进行校核。

第 7 节 其他要求

4.7.1 货物浮力、砰击和上浪

货物外伸部分有时会浸没于水中，遭受波浪砰击和/或浸没产生的载荷，应在分析中予以考虑。

4.7.2 波浪引起的总纵弯曲

- (1) 在下列情况下，纵向波浪弯曲效应的潜在影响应予以考虑：
 - ① 货物比驳船的长度长 1/3；
 - ② 货物纵向支撑在 2 组以上的支撑物上；
 - ③ 船体和货物的刚度相差较大（如大型导管架/组块），在船体和货物之间产生不可接受的应力；
 - ④ 绑扎的形式使得货物和船之间的柔性很小或者没有柔性。
- (2) 通常在考虑波浪引起的总纵弯曲时，采用波长等于驳船长度 L、波高大于 L/20 的规则波作用下计算船的准静态中拱和中垂。

第 5 章 导管架滑移下水分析

第 1 节 一般规定

5.1.1 本章适用于大型导管架的滑移下水分析。典型分析流程包括：下水前和下水过程中驳船和导管架联合体的稳性分析、驳船强度分析、下水动力分析（下水轨迹和受力分析）、导管架下水过程中的结构完整性分析、下水参数敏感性分析。

5.1.2 导管架滑移下水分析的关键点主要包括：

(1) 下水驳船

① 下水前和下水过程中，驳船的稳性和总纵强度是否满足要求；

② 驳船在最大艏吃水时受到的水压力是否在设计许用值内；

③ 整个过程中，摇臂和销轴的受力是否在其承受范围内。

(2) 导管架

① 导管架是否保持良好的下水轨迹，即不出现大的横摇，底部间隙足够等；

② 导管架杆件及其水密附属构件（如管系和阀门）在下潜至最大入水深度时，是否能承受静水压力；

③ 导管架在下水过程中，导管架本身的结构完整性是否满足要求；

④ 导管架下水过程中速度较快，结构物的局部拍击应力是否满足规范要求。

5.1.3 导管架滑移下水作业可在 72 小时内完成，属于气象限制性作业，可根据可靠气象预报选择设计环境条件。

5.1.4 导管架滑移下水动力分析通常在静水中进行，不考虑风、浪、流的影响。

第 2 节 分析准则

5.2.1 导管架储备浮力

(1) 导管架下水后，其储备浮力不应少于导管架总浮力的 10%；

(2) 在破损情况下，储备浮力不应少于导管架总浮力的 5%。

5.2.2 稳性

(1) 导管架下水前，驳船和导管架联合体的稳性高应大于 1 m，稳性消失角应大于 20 度或 $15+10/GM$ ，取其大者。回复力矩与风倾力矩曲线面积比应大于 1.4(参见图 4.3.1)；

(2) 从导管架开始滑动到摇臂转动过程中，驳船和导管架联合体的稳性高应为正值；

(3) 由 1.5 倍导管架下水设计风速引起的横倾角应在可接受范围内。

5.2.3 导管架下水轨迹

导管架应有良好的下水轨迹。导管架与驳船分离后，导管架与海底泥面最小间隙应大于 10% 水深或 5 m，取其大者。导管架下水后，不会在水中出现翻转情况。

5.2.4 驳船强度

(1) 驳船总纵强度、摇臂反力应在许用范围内；

(2) 驳船和滑道上的结构应力应满足规范要求；

(3) 船艏浸没深度应在驳船允许范围内。

5.2.5 导管架强度

导管架结构应力应满足规范要求，导管架杆件应能承受入水时的波浪拍击力。

5.2.6 敏感性分析

分析下水滑道的摩擦系数、船舶浮态、导管架重量重心的误差等对下水分析结果的敏感程度。重心偏移误差一般考虑 $X_{cg} \pm 0.3 \sim 0.5 \text{ m}$ ， $Y_{cg} \pm 0.3 \sim 0.5 \text{ m}$ ， $Z_{cg} \pm 0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 的组合（其中 Z 为导管架高度方向，X/Y 为水平方向），重量误差考虑 $\pm 3\% \sim 5\%$ 。

第3节 下水动力分析

5.3.1 分析模型

(1) 导管架水动力、浮力和质量模型应包含所有构件：主结构、浮箱、次要结构和“非结构构件”，如沉箱、导桩等；

(2) 导管架节点处构件重叠较多时，应对此处杆件的节点考虑合理的偏移，以准确模拟杆件的重量和浮力；

(3) 驳船模型应考虑增加驳船质量和浮力的所有构件，包括滑道和摇臂。驳船的浮力模型在下水期间应按吃水/纵倾的变化准确模拟；

(4) 对驳船和导管架的拖曳力系数、附加质量和阻尼系数应进行精确模拟。

5.3.2 分析方法

(1) 工程分析中，驳船的初始吃水一般取 70%~80% 型深，初始纵倾角一般取 $3.75^{\circ} \sim 4.5^{\circ}$ ；

(2) 利用专业软件对导管架滑移下水进行时域仿真分析，获取导管架和驳船的运动轨迹、摇臂反力的时间历程，依据分析准则校核关键参数。

第4节 下水结构分析

5.4.1 分析工况

下水过程中，导管架的结构分析需考虑若干个特征时刻作为分析工况。一般选取导管架处在摇臂上转动前、转动时、导管架与驳船分离时以及下潜至最大深度时作为结构分析的特征时刻。除此之外，还需选取导管架下水腿的管节点以及相邻节点间管段中心位置经过摇臂销轴时作为特征时刻进行结构分析。

5.4.2 分析模型

(1) 导管架下水结构分析应考虑导管架的浮力、重力、惯性力、摩擦力、支撑力和水动力等；

(2) 导管架和驳船/摇臂之间用大刚度、只可压缩的弹簧在每个腿节点处连接；摇臂销轴处施加垂直于摇臂的固定约束，并在导管架端部施加小刚度的水平弹簧约束。图 5.4.2 分别表示导管架转动前、转动时、分离时以及下水后的边界条件。

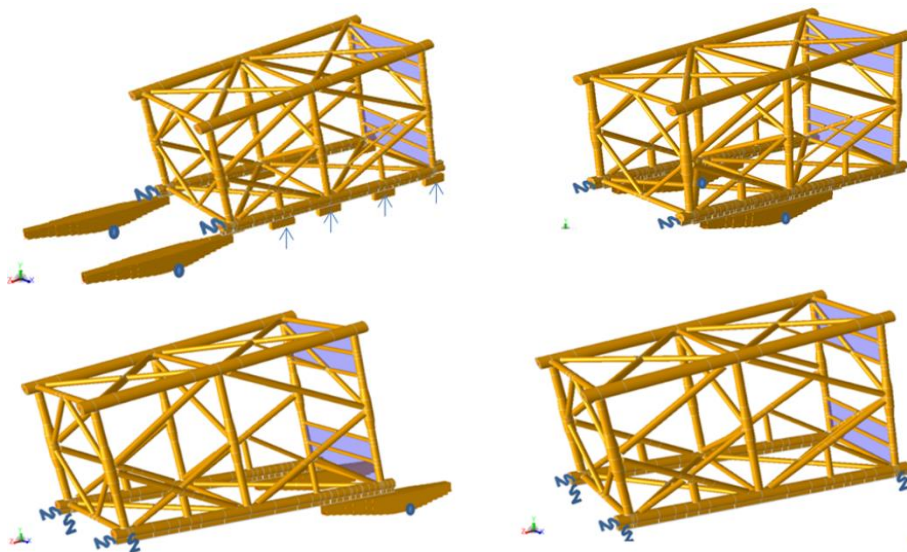


图5.4.2 导管架下水结构分析模型示意图

5.4.3 强度校核

- (1) 杆件和节点应力应根据相关规范进行校核；
- (2) 导管架的最大入水速度可用于砰击强度校核，也可考虑用下水动力分析得到导管架上每个杆件的入水速度校核砰击强度。

第6章 导管架扶正分析

第1节 一般规定

6.1.1 本章适用于导管架的扶正分析。

6.1.2 导管架扶正分析主要验证扶正过程中的稳性高，泥面间隙和吊机/吊具能力是否能满足要求，同时确保导管架的结构完整性。

6.1.3 本章不包含导管架舱室分隔的具体要求。

6.1.4 如采用吊机辅助方式扶正，应确保索具平台在水面之上；如采用自灌方式扶正，应确保入水孔在水面之下。

6.1.5 导管架扶正作业可在72小时内完成，属于气象限制性作业，可根据可靠气象预报选择设计环境条件。

第2节 分析准则

6.2.1 储备浮力

(1) 无起重机辅助下的储备浮力要求见表6.2.1(1)，浮力为正常状态导管架浮力，重力应采用导管架的预计上限重量；

无起重机辅助下的储备浮力要求 表6.2.1(1)

工况	完整	破损
已起吊导管架，若需要在扶正前重新装配索具*	10%	5%
通过压载进行扶正期间，无需起重机辅助	8%	4%
绝对最小值（经各方同意后）	5%	2.5%

注：*表示导管架的浮态应能满足索具装配的要求。即有一侧腿平面在水面上，保持水平漂浮，索具平台应浮在水面之上。

(2) 起重机辅助下的储备浮力要求见表6.2.1(2)。在储备浮力计算中：

①重力需在导管架重量基础上减去起重机起吊半径下90%的起吊能力；

②当两台吊机连接导管架时，重力需在导管架重量基础上分别减去两台起重机各自起吊半径下80%的起吊能力。

起重机辅助下的储备浮力要求 表6.2.1(2)

工况	完整	破损
起吊入水导管架，进行了静态和动态分析，且有应急方案*	8%	4%
起吊入水导管架，仅进行了静态分析	12%	6%

注：*表示应急方案是指在静态吊力超过预计静态荷载时采取的修正措施。

6.2.2 稳性

(1) 应校核导管架完整和单舱破损状态下的浮态和稳性高；

(2) 下水后和扶正过程中，导管架的最小稳性高要求见表6.2.2。

最小稳性高要求

表 6.2.2

工况	完整	破损
下水后，横向和纵向稳性高	0.5 m	0.2 m
扶正期间，横稳性高	0.5 m	0.2 m
扶正期间，纵稳性高	>0.0 m*	>0.0 m*
扶正后而未坐底前，横向和纵向稳性高	0.5 m	0.2 m

注：*表示在扶正过程中，导管架在一定的时间段可能会出现纵向不稳定的状态。在评估此状况无不良后果并让各利益方获悉后，这种短时间的失稳也是可以接受的。

6.2.3 导管架的泥面间隙

在扶正过程中，导管架结构及附属构件的最小泥面间隙应满足表 6.2.3 的要求。

导管架的最小泥面间隙要求

表 6.2.3

工况	完整	破损
自由漂浮状态； 以及自扶正导管架在扶正过程中；	大于 10% 水深或 5 m，取 其大者	>2 m
通过可控压载进行扶正期间，无论有无起重机辅助	>5 m	>2 m

6.2.4 起吊能力

扶正过程中浮吊的起吊重量和高度应在其能力范围之内。

6.2.5 强度

- (1) 导管架、吊耳、吊具等应力应满足规范要求；
- (2) 校核吊点和吊点附近的结构时，考虑 2.0 倍的载荷动态放大系数；而其它结构考虑 1.35 倍的载荷动态放大系数；
- (3) 吊索上的张力应小于其额定安全工作载荷。

6.2.6 敏感性分析

以上要求应考虑导管架的重量误差、重心偏移误差等情况，确保导管架在这些参数发生微小变化时，不会对浮态和扶正的可操作性有影响。重心偏移误差一般考虑 $X_{cg} \pm 0.3 \sim 0.5 \text{ m}$ ， $Y_{cg} \pm 0.3 \sim 0.5 \text{ m}$ ， $Z_{cg} \pm 0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 的组合（其中 Z 为导管架高度方向，X/Y 为水平方向），重量误差考虑 $\pm 3\% \sim 5\%$ 。

第 3 节 扶正分析

6.3.1 一般要求

本节适用于吊机辅助方式的扶正分析，分为静态分析和动态分析。

6.3.2 扶正静态分析

- (1) 静态分析的目的是获取扶正的操作流程方案，即吊机提升/下放和充水的步骤和幅度，并校核其可操作性；
- (2) 静态分析实际上是对每一次吊机和（或）压载的操作进行平衡位置的求解，并确定每一步导管架的压载量和泥面间隙，以及吊机的高度和吊重。静态分析的流程和示例参见附录 8.2。

6.3.3 扶正动态分析

- (1) 动态分析的目的是考察起吊船的波浪诱导运动对扶正的影响；
- (2) 分析流程：从静态分析中选取若干个特征状态，获取该状态下吊钩高度、导管架浮态、充水状态等信息，求解系统的平衡状态，在此平衡状态下进行动态分析；
- (3) 动态分析可采用频域分析方法或时域分析方法。

(4) 若进行频域分析, 则需计算起吊船的运动 RAO, 选取扶正的遭遇海况进行谱分析, 预报该海况下的钩头运动和吊钩力;

(5) 若进行时域分析, 则可获取驳船钩头、吊耳处的运动和受力, 以及导管架关键点(最小底部间隙位置)的运动时间历程, 并经后处理得到设计值。

第 4 节 结构分析

6.4.1 分析工况

考虑扶正过程中若干个特征姿态作为分析工况进行导管架结构分析; 一般按导管架转动角度选取(如导管架转动每隔 5° 或 10°)。

6.4.2 分析模型

考虑导管架浮力、重力、惯性力和水动力(如进行动态分析)等, 同时用拉杆单元模拟吊索, 在导管架底部水平层方向施加小刚度弹簧约束。

6.4.3 强度校核

杆件和节点应力应根据相关规范进行校核。

第 7 章 组块浮托安装分析

第 1 节 一般规定

7.1.1 本章给出了大型导管架平台的组块浮托安装分析的准则和方法。

7.1.2 本章浮托安装适用于采用运输驳船压载方式进行载荷传递的单船、高位浮托安装分析。

7.1.3 浮托安装主要分为三个阶段：进船阶段、对接阶段和退船阶段。浮托安装分析主要针对这三个阶段进行数值模拟。

第 2 节 环境条件

7.2.1 一般要求

(1) 浮托安装的基准时长通常小于 72 小时，属于气象限制性作业，设计环境条件的选取可独立于极值统计数据，而采用足够概率下的气候条件；如浮托安装的基准时长预计大于 72 小时，建议按非气象限制性作业来考虑；

(2) 浮托安装一般在平静海况下进行，环境条件的选取应注意以下几点：

① 浮托安装对不同季节（月份）和方向的环境条件比较敏感，环境条件应能按季节（月份）和方向分别给出；

② 对于选定浮托安装的环境条件，首先应进行气候窗口分析，用以评估在计划季节（月份）的设计环境条件下可以安全进行浮托安装作业的概率水平；

③ 浮托安装环境条件的最终确定应基于以下分析结果：气候窗口分析；运动、间隙、碰撞力分析；驳船、结构物和配件等的强度分析；锚泊或动力定位能力分析；成本效益分析等。

7.2.2 待机系泊环境条件

(1) 待机系泊环境条件一般选取一年重现期的月极值，也可根据实际条件进行降低；

(2) 待机阶段的限制环境条件一般按如下条件选取：

① 波浪取 90% 超越概率有义波高；

② 流速选取作业海域观测到的最大流速；

③ 限制风速根据系泊缆绳允许的最大拉力确定。

(3) 典型待机状态下的系泊环境条件如表 7.2.2 所示。

待机阶段系泊的环境条件示例

表 7.2.2

有义波高 (m)	谱峰周期 (s)	1 小时平均风速 (m/s)	流速 (m/s)
2.50	6.85~10.85	12.0	0.6

7.2.3 浮托安装环境条件

(1) 浮托安装一般要求在较为平静的海况下进行；为了提高可操作性，通常在不同浪向下限定不同的浪高：

① 在迎浪和随浪情况下，驳船的抗波浪能力较强，可将浪高限定的高一些；

② 对于横浪情况，驳船容易产生大的运动，对 LMU 的对接极为不利，需将浪高设定的小一些；

③ 斜浪情况介于迎浪和横浪之间。

(2) 确定限制作业的有义波高等环境参数是确保浮托安装顺利进行的关键因素。可采用以下方法：根据波高和周期分布，进行各浪向下的水动力分析，统计得到对应浪向和

有义波高的升沉运动幅值，从而确定各浪向下的限制波浪条件，再根据波高选取对应分布概率的风速和流速；

(3) 工程中也可参考如下方式选取限制环境条件：

① 风速一般限制在 20~25 kn 以下；

② 一般迎浪和随浪的有义波高取 1.5 m，斜浪取 1.0 m，横浪取 0.5 m；

③ 海流速度一般限制在 1~2 kn 以下。

(4) 浮托安装可假定在低潮位情况下进行；如果在低潮位的压载能力或稳性不足，一般可以按照平均潮位或平均海平面进行设计。

第 3 节 气候窗口分析

7.3.1 气候窗口分析又称为可操作性分析，目的是为了得到在某时间段内可进行浮托安装操作的概率。

7.3.2 根据某个月内波高和浪向的联合分布概率，可统计出该月内在限定浪高条件下的海况出现概率，风和流的计算类似。

7.3.3 在得到风、浪、流在各自限值范围内出现的概率后，通过下式可得到限定环境条件下的浮托安装可操作概率：

$$P_{Joint} = \sum P_{Wind} \times \sum P_{Wave} \times \sum P_{Current}$$

式中： P_{Joint} ——限定环境条件下的可操作概率；

P_{Wind} ——限定风速条件下的出现概率；

P_{Wave} ——限定波高条件下的出现概率；

$P_{Current}$ ——限定流速条件下的出现概率。

7.3.4 上述限定环境条件下的可操作概率计算公式隐含了风、浪和流之间相互独立的假定，得到的结果偏于保守。

7.3.5 工程中一般以月份为时间段进行浮托安装的可操作性分析。在得到每个月的可操作概率后，应选择可作业天数（即概率）超过 50% 的月份进行浮托安装作业。南海海域进入 8 月份后为台风频发期，一般选择 8 月份之前完成浮托安装作业。

第 4 节 驳船稳性和总纵强度分析

7.4.1 压载分析

(1) 利用压载系统增加船舶吃水，从而将上部组块的重量转移到导管架上，这是组块浮托安装中的常见做法。随着吃水增加和载荷转移，DSU 由满载变成空载，LMU 由空载变成满载，上部组块重量由驳船转移到导管架上，驳船与上部组块脱离，参见图 7.4.1；

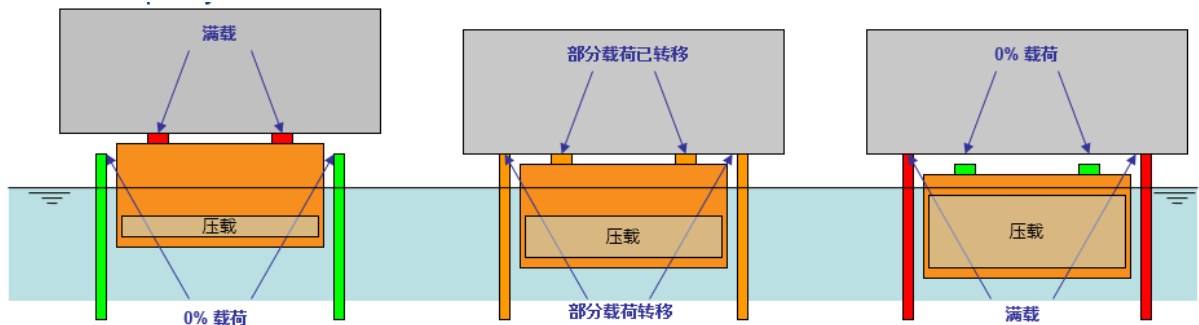


图7.4.1 压载和载荷转移过程

- (2) 浮托安装的压载分析是为了确保驳船有足够的压载能力完成浮托安装；
- (3) 根据浮托安装过程中不同吃水和载荷转移状态，得到浮托安装过程的压载方案，船上舱室应能满足压载方案的要求；
- (4) 需根据压载方案验证驳船的泵送能力，即计算压载或排载所需的时间应少于操作所需的时间；且按照操作要求需考虑一定的冗余能力。

7.4.2 稳性分析

- (1) 浮托安装过程中的稳性高应大于 0.5 m，任何情况下不得小于 0.3 m。浮托船的最小干舷要求为 1.0 m，在有足够的确保稳性的措施条件下，干舷小于 1.0 m 也是可接受的；
- (2) 破损稳性一般不作要求。

7.4.3 总纵强度分析

- (1) 在浮托安装过程中，由于压载调整和载荷转移引起了船体重量分布的变化，需对驳船总纵强度进行校核；
- (2) 工程中一般采用许用强度法，并使用在港作业的静水总纵强度许用值。

第 5 节 系泊分析

7.5.1 一般要求

应对浮托安装待机阶段的系泊系统布置和系泊缆强度进行校核。

7.5.2 系泊缆强度要求

- (1) 浮托操作的系泊系统仅考虑系泊缆的破断强度，不考虑其疲劳强度。不同状态和分析方法的张力限制要求和等效安全系数见表 7.5.2；
- (2) 浮托操作的系泊系统一般只考虑完整工况；
- (3) 止链器、导缆器及其基座等支撑结构应有相当于锚链的设计强度，或者更高。

系泊缆张力限制及安全系数 **表 7.5.2**

系统状态	分析方法	最大张力/MBL	安全系数
完整	准静力	≤50%	2.0
完整	动力	≤60%	1.67
破损	准静力	≤70%	1.43
破损	动力	≤80%	1.25

7.5.3 锚抓力要求

在设计环境条件下拖曳锚的最大水平拉力不应超过其承载能力，安全系数见表 7.5.3；同时锚端不应有上拔力。

安全系数 **表 7.5.3**

系统状态	分析方法	安全系数
完整	准静力	1.0
完整	动力	0.8

7.5.4 间距要求

- (1) 系泊系统与其它结构物之间应保持足够的间距以避免碰撞；
- (2) 系泊缆跨越管线情况：完整系泊状态下，系泊缆跨越管线的悬链线架高处，系泊缆与管线之间至少应有 10 m 的垂向间距。完整系泊状态下，若管线有保护措施，系泊缆与管线可以发生一定的接触，但接触点一定要避免发生在海底处；

(3) 系泊缆相互跨越情况：如果跨越处有一根系泊缆躺底，那么完整条件下两根系泊缆间跨越处的垂向间距至少在 10 m 以上；如果系泊缆在跨越处均呈悬浮状态，那么跨越处的垂向间距至少在 20 m 以上；

(4) 系泊缆靠近导管架腿情况：在待机系泊状态下，如果系泊缆接近待安装的导管架平台时，系泊缆与最近的导管架腿的水平距离应不少于 10 m；

(5) 锚靠近其它结构物情况：如果结构物位于锚拖动的轨迹附近，则锚的最终位置与结构物之间应至少保持 300 m 的距离。

7.5.5 分析方法

(1) 系泊系统分析方法可分为准静力分析法和动力分析法。浮托操作的海域一般较浅，通常可采用准静力分析方法；如操作海域较深，需考虑系泊缆的动力效应时，可针对关键工况进行全耦合动力分析；

(2) 浮托系泊分析中，船体和系泊缆的动力学模拟一般采用时域分析方法，求解描述耦合系统平均、低频和波频组合响应的一般运动方程。时域模拟的时间应足够长以得到稳定的统计峰值；

(3) 系泊分析中，系泊缆的预张力对计算结果会产生明显的影响；一般情况下，预张力不应大于其破断力的 20%。当系泊系统的布置存在不对称因素时，需进行全方向的数值模拟，且环境方向的间隔应不大于 45° 。

第 6 节 对接分析

7.6.1 对接分析准则

(1) 当准备对接时，对接处的水平运动幅值一般不超过 0.5 m；

(2) 对接过程中的偏移半径（最大水平偏移）应在承接喇叭口的捕捉半径（对齐允许误差）之内；工程中，捕捉半径一般小于 1.0 m；

(3) 护舷碰撞或冲击载荷不得超过护舷和导管架的极限载荷；

(4) LMU 冲击载荷不得超过 LMU、导管架和上部组块的设计极限载荷；

(5) 驳船的压载能力应能满足操作时间窗口的要求。

7.6.2 分析工况

(1) 在对接阶段，分析工况主要依据转移到导管架上的上部组块占其总重的百分比来划分；如可划分为 0%，20%，40%，60%，80% 和 100% 等；

(2) LMU 缓冲件的能力设计需体现到上述工况划分上；如当 LMU 缓冲件设计成承受 70% 上部组块重量时，则分析工况中应考虑 70% 重量转移情况。此外，DSU 缓冲件支撑能力的分析工况也应予以考虑；

(3) 还可根据上部组块和导管架间的垂直间隙对分析工况进行细分，以尽可能捕捉到 LMU 可能承受最大载荷的情况。如当插尖接近抵达承接喇叭口底部而未转移重量时，LMU 上的载荷可能达到较大数值；

(4) 一般情况下，上部组块为非对称结构，各组块腿落到导管架上时所受的静力载荷不同，耦合分析时应考虑 $0^\circ \sim 360^\circ$ 全浪向，且浪向间隔应不大于 45° 。

7.6.3 分析方法和模型

(1) 浮托安装分析中，导管架、驳船和组块之间的耦合作用主要通过护舷、LMU 以及 DSU 模拟；

(2) 浮托安装对接阶段的耦合分析一般采用时域数值模拟方法；

(3) 对接分析模型如图 7.6.3(1) 所示，上部组块、驳船和导管架之间通过弹簧系统连接；

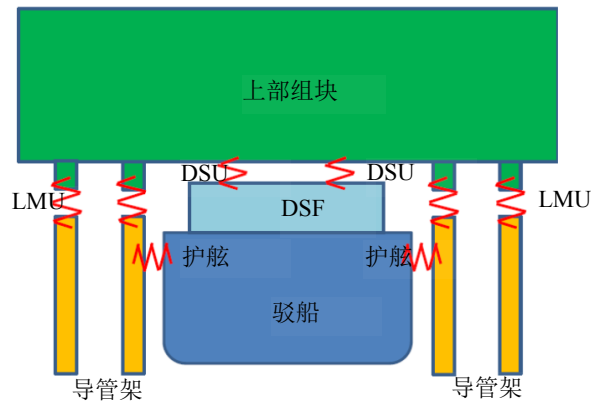


图7.6.3(1) 浮托分析模型

(4) 护舷分为横荡护舷和纵荡护舷，横荡护舷能够减缓横向碰撞并限制船的横向运动，纵荡护舷限制船的纵向运动并起到定位的作用；

(5) 护舷的受力主要在面板的法线方向，其受力与变形的关系是非线性的，典型的护舷受力-变形曲线如图 7.6.3(2)所示。在分析模型中，此曲线可用非线性压缩弹簧模拟。护舷切向方向的摩擦力在实际分析可不予考虑；

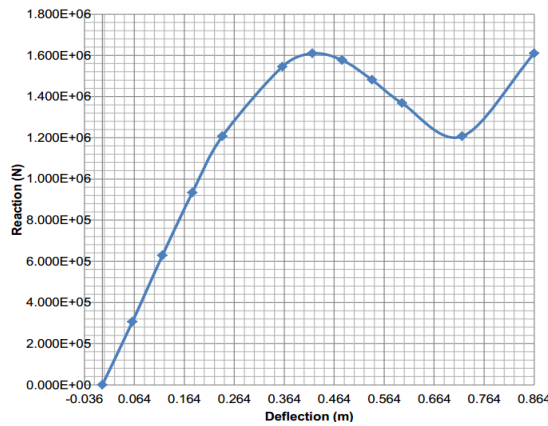
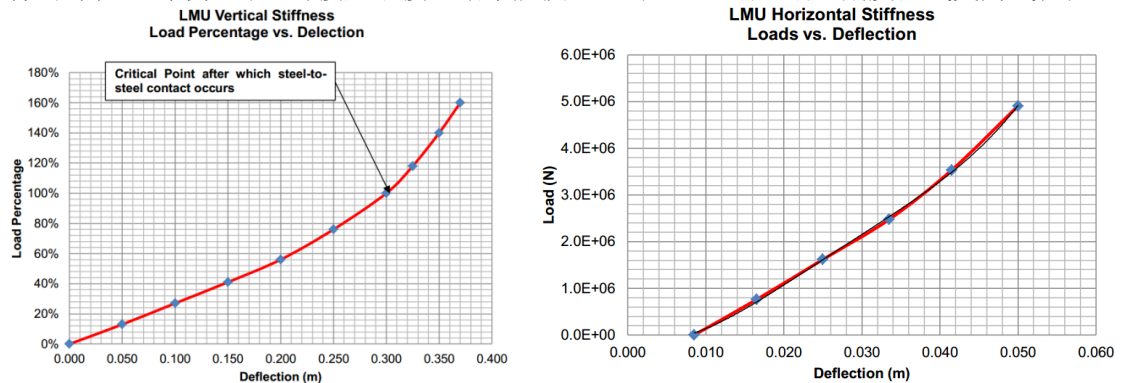


图7.6.3(2) 护舷受力-变形曲线

(6) LMU 内的缓冲件是一个弹性体，其受力与变形的关系是非线性的，在分析模型中可用非线性弹簧模拟。典型垂向和水平受力-变形曲线如图 7.6.3(3)所示。当 LMU 缓冲件的冲程达到最大时，对接处于接近结束阶段，此时 LMU 钢碰钢，刚度曲线变为线性；



① 垂向受力-变形曲线

② 水平受力-变形曲线

图7.6.3(3) LMU受力-变形曲线

(7) 在分析模型中, 可用非线性压缩弹簧模拟 DSU 内缓冲件的非线性特性, 典型 DSU 内缓冲件的垂向受力-变形曲线如图 7.6.3(4)。在 DSU 缓冲件设计中, 往往将其设计成只能承受一部分上部组块重量, 如 30%, 即只有当上部组块转移到导管架上的重量达到 70% 以上, DSU 内缓冲件才开始发挥作用; 在此之前, 缓冲件处于完全被压缩状态, DSU 处接触属于钢碰钢阶段;

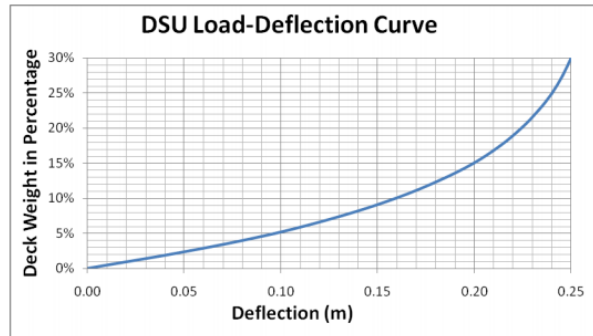


图7.6.3(4) DSU垂向受力-变形曲线

(8) 驳船进入槽口后, 船体水平位移受护舷和拖轮等的限制, 系泊系统对护舷、LMU 和 DSU 的动力响应影响很小, 在分析中可忽略系泊系统的作用。

第 7 节 进船和退船分析

7.7.1 进船分析准则

- (1) 浮托驳船的稳性高一般要求大于 1.0 m, 任何情况下均不得小于 0.3 m;
- (2) 为确保驳船的艏部 (或艉部) 能够顺利进入导管架槽口, 船艏部 (或艉部) 的横向运动应不能过大, 一般而言摆动幅度要求小于 2.0 m;
- (3) 进船过程中, 驳船的纵、横向运动以及偏航角必须控制在一定范围内;
- (4) 在进入槽口时, 上部组块与 LMU 之间应确保有足够的垂向间隙, 以避免上部组块腿与 LMU 发生碰撞。在考虑潮位和船的运动响应之后, 此垂向间隙应不小于 0.5 m;
- (5) 护舷与导管架之间的碰撞力应小于导管架以及护舷本身的承受极限。

7.7.2 退船分析准则

- (1) 驳船应有足够的干舷, 一般要求大于 1.0 m;
- (2) 在上部组块和支撑件之间未获得足够间隙前, 冲击载荷仍然存在。支撑件上的垂向冲击载荷不得超过支撑件和上部组块支撑点的设计极限载荷;
- (3) 应确保 DSU/支撑件和上部组块之间有足够的垂向间隙进行退船作业。在考虑潮位和船的运动响应之后, 此垂向间隙应不小于 0.5 m;
- (4) 护舷碰撞或冲击载荷不得超过护舷和导管架的极限载荷;
- (5) 在考虑了潮位和船的运动响应之后, 驳船底部和导管架安装槽口底部横管的垂直间隙应大于 0.5 m。

7.7.3 分析工况

- (1) 进船阶段, 根据驳船与导管架的纵向相对位置, 一般可分为四个分析步骤 (假定沿进船方向有两排导管架腿); 以艏部进船为例, 进船分析的步骤如图 7.7.3 所示;
- (2) 退船阶段, 分析步骤的划分与进船分析类似, 驳船与导管架之间的纵向相对位置与进船时相反。

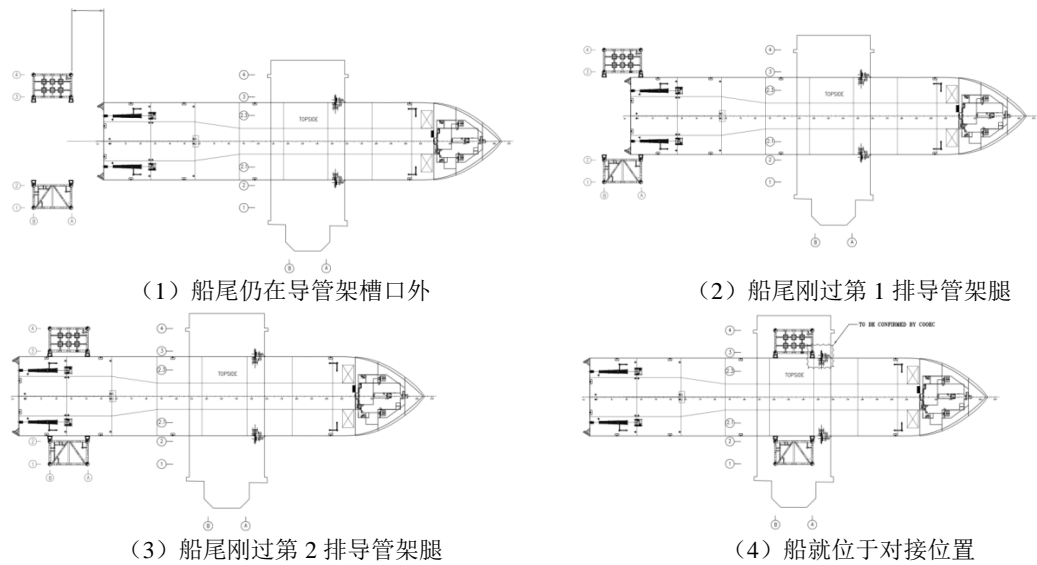


图7.7.3 进船阶段的四个步骤示例

7.7.4 分析方法和模型

进船和退船分析方法与对接分析基本相同，分析中需考虑系泊系统的影响。

第 8 节 计算结果处理

7.8.1 对于每个耦合分析工况（包括进船阶段、对接阶段以及退船阶段的各个分析步骤）均需输出相应的数值模拟结果，并通过统计分析，验证以下参数是否满足要求：

- (1) 系泊缆张力、锚端水平拉力和上拔力的最大值；
- (2) 上部组块关键点的运动响应，包括组块重心处和 LMU 处的运动响应，以及进船后 LMU 的水平和垂向运动范围；
- (3) 驳船关键点的运动响应，包括驳船艏部和底部，以及 DSU 处的运动响应；
- (4) LMU/DSU/护舷的受力除了应满足自身能力要求外，还应确保碰撞力在可承受范围内。

7.8.2 每个分析工况的模拟时长通常可取 1 小时。图 7.8.2(1)和图 7.8.2(2)分别给出了典型的运动时间历程和护舷受力时间历程结果。

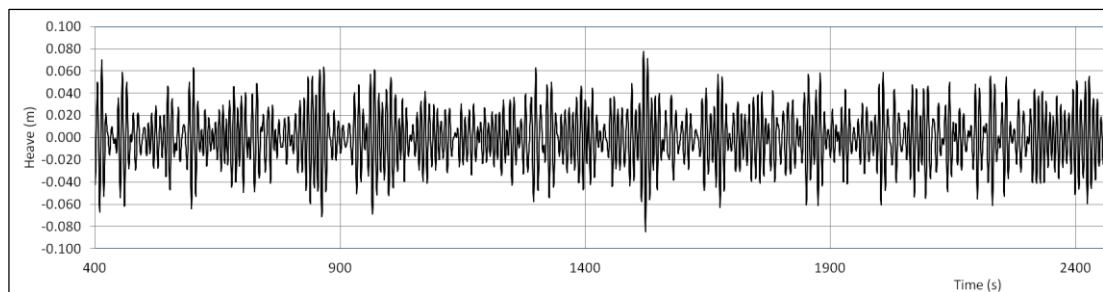


图7.8.2(1) 驳船垂荡运动时间历程

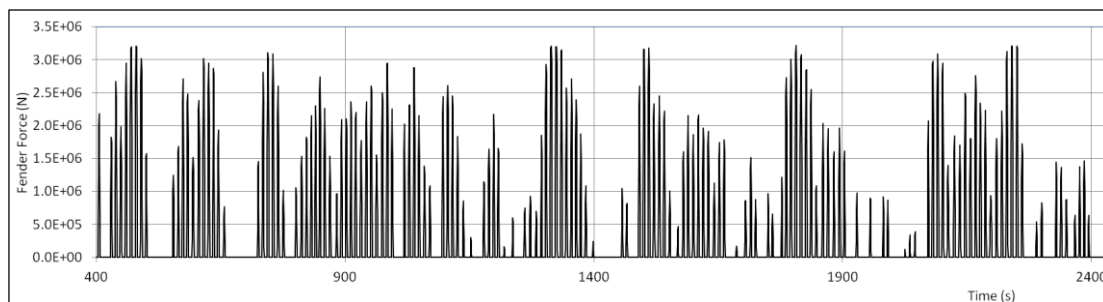


图7.8.2(2) 护舷受力时间历程

7.8.3 一般情况下，取时间历程的统计最大值（或最小值）作为分析结果；为了避免计算结果对随机数的敏感性，可取若干个随机数进行数值模拟，然后对所有统计结果求平均值，得到最终结果。

7.8.4 计算 LMU 的捕捉半径时，如果只统计横向和纵向运动的最大值，则得到的结果可能过于保守，直接输出水平运动的时间历程，然后统计其最大值更为合适。

第 9 节 结构分析

7.9.1 一般要求

(1) 应提取护舷、LMU 和 DSU 的最大受力结果，用于导管架结构和上部组块结构的强度校核；

(2) 整个系统所受的撞击力应在上部组块、导管架和驳船的可承受范围之内，且应考虑一定的裕度。

7.9.2 分析工况

(1) 确定某个导管架（或上部组块）腿上（或支撑）受力达到最大的时刻；最大受力结果需在所有环境方向下的分析工况中获取；对应最大受力时刻，从时间历程中获取其它腿上（或支撑）的受力结果，形成一个载荷工况；

(2) 对于每个 LMU/DSU，均需考虑 X、Y、Z 三个方向上受力最大的载荷工况；

(3) 对于每个护舷，均需考虑其承受最大压力的载荷工况；

(4) 除此之外，总的碰撞力（力矩）最大的时刻也需进行结构分析，且需考虑 X、Y、Z 三个方向受力最大和扭矩最大的载荷工况。

7.9.3 强度校核

导管架和上部组块的杆件和节点应力应根据相关规范进行校核。

附录

第 1 节 导管架下水分析流程和示例

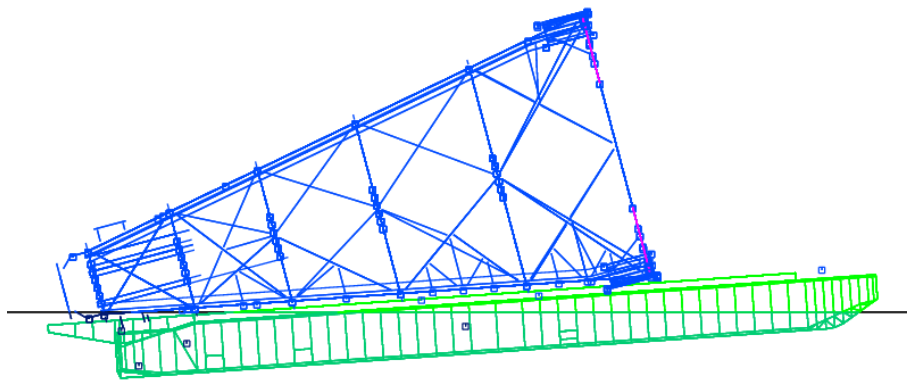
1.1 导管架下水分析的流程主要包括：

- (1) 建立模型，除了导管架和船模型，还需对摇臂、导管架下水支架等进行模拟；
- (2) 检查导管架的储备浮力是否满足要求；
- (3) 设定下水时驳船浮态，并进行压载；
- (4) 利用 MOSES 软件进行下水稳性分析和总纵强度分析；
- (5) 利用 MOSES 软件进行下水时域仿真分析，进行动力响应校核；
- (6) 利用 MOSES 软件生成下水过程中若干个关键时间点作用在导管架的载荷，包括浮力、重力、水动力、惯性力以及船舶摩擦和支撑力等；
- (7) 将 MOSES 生成的载荷转换为 SACS 软件格式的载荷文件；
- (8) 利用 SACS 软件读入载荷文件，校核导管架下水过程中的结构完整性；
- (9) 进行敏感性分析：考察下水滑道的摩擦系数、驳船浮态、导管架重量重心的误差等对下水分析结果的敏感程度。

1.2 对于驳船模型，应注意船的静水力和水动力特性须准确模拟；水动力特性包括拖曳力系数、附加质量和阻尼系数等；流体力学参数的确定以驳船模型试验数据为首选。若缺乏模型试验资料，可引用同类型驳船的数据库资料确定流体力学参数，或使用业界认可的经验公式计算。对于在以往项目中模拟过的驳船，并且具有实测数据与模拟数据对比的，如必要应对相关参数作适当修正。

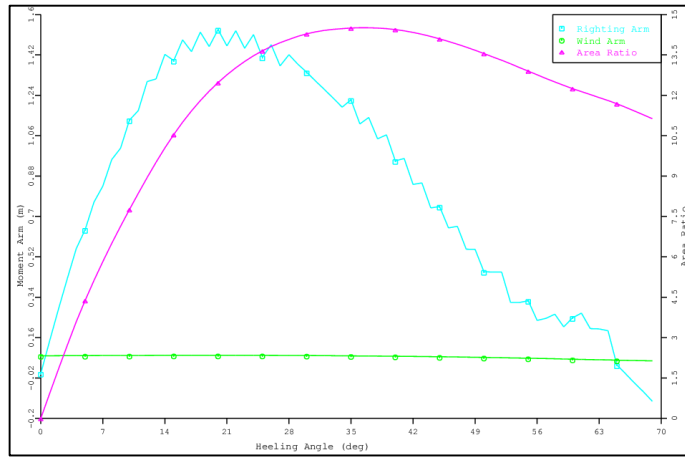
1.3 以某典型深水导管架为例，给出利用 MOSES 软件进行导管架滑移下水分析的算例。

1.4 建立驳船和导管架模型。船舶的静水力模型除外壳模型还包括舱室模型。附图 1.4 所示为用 MOSES 软件建立的驳船和导管架模型，其中驳船已压载至所需的吃水和纵倾。

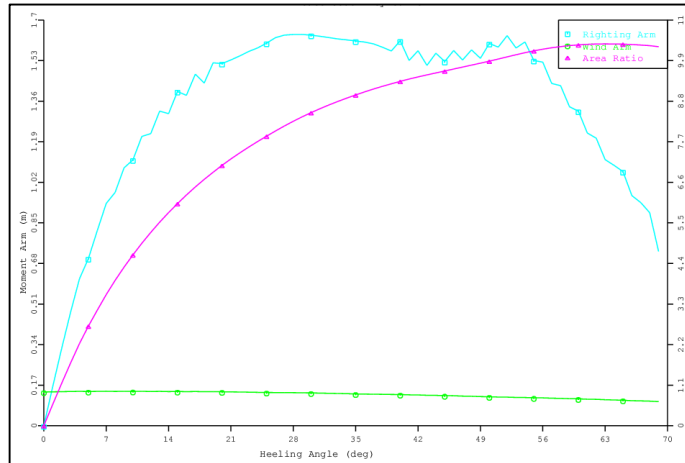


附图1.4 驳船和导管架的MOSES模型

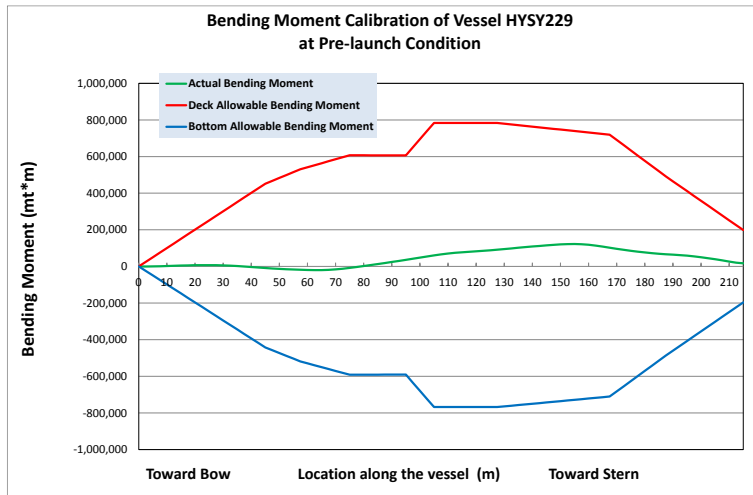
1.5 下水仿真计算前，首先应校核下水后导管架的储备浮力是否满足要求，其次应校核下水过程中（至少包括下水前和旋转瞬间两个工况）驳船的稳性和总纵强度。此算例中，导管架的储备浮力为 11.69%，满足 5.2.1 的要求。稳性校核如附图 1.5(1)和附图 1.5(2)所示，总纵强度校核的结果见附图 1.5(3)~附图 1.5(6)。



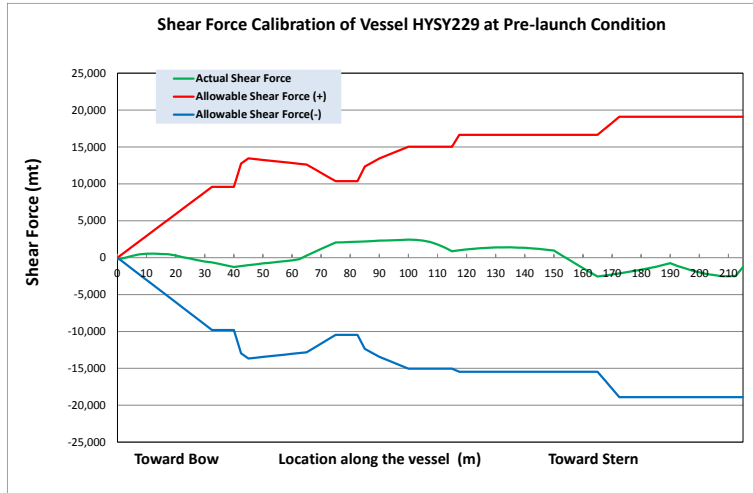
附图1.5(1) 下水前驳船、导管架联合体的稳性曲线



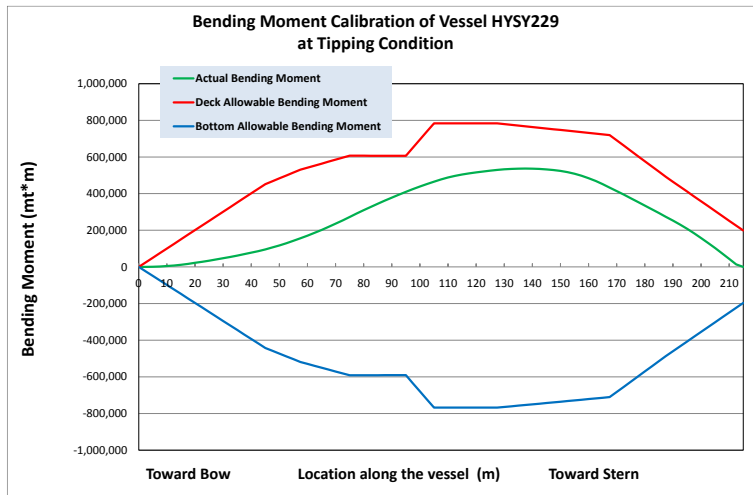
附图1.5(2) 旋转时驳船、导管架联合体的稳性曲线



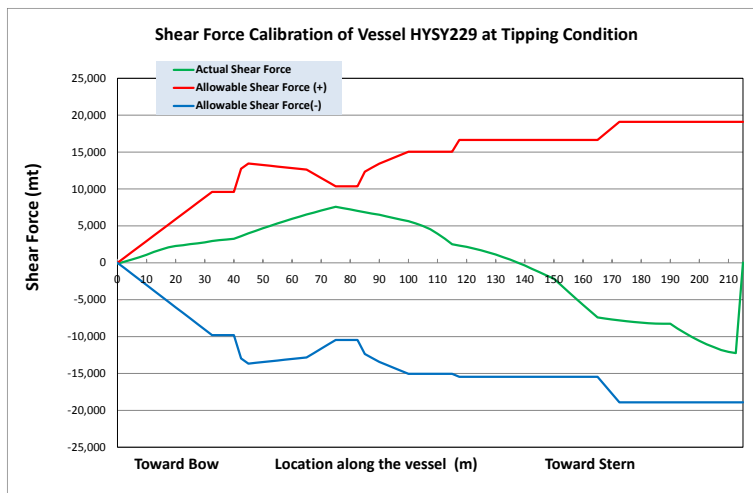
附图1.5(3) 下水前总纵强度校核-弯矩



附图1.5(4) 下水前总纵强度校核-剪切力

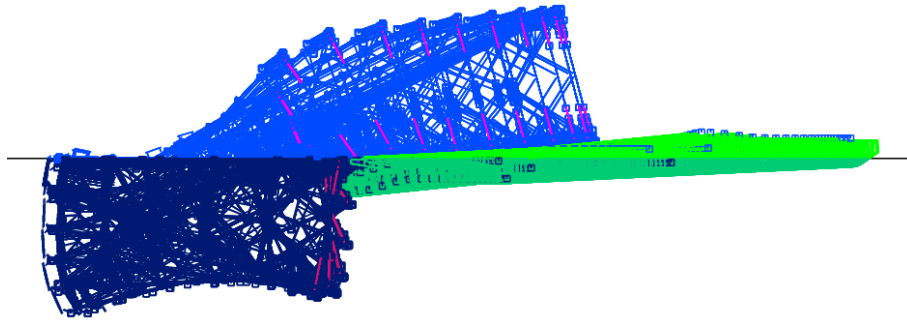


附图1.5(5) 旋转时总纵强度校核-弯矩



附图1.5(6) 旋转时总纵强度校核-剪切力

1.6 利用 MOSES 软件对导管架滑移下水过程进行时域仿真分析，下水轨迹如附图 1.6(1)所示；附表 1.6 给出了下水分析的关键参数，导管架的最大入水深度和底部间隙、船艏潜深和摇臂支反力的分析结果如附图 1.6(2)和附图 1.6(3)所示，均能满足 5.2 节的要求。



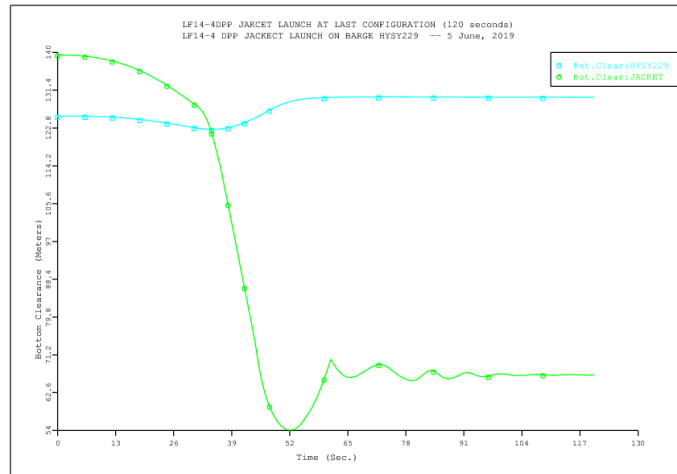
附图1.6(1) 下水过程姿态

下水动力分析结果示例

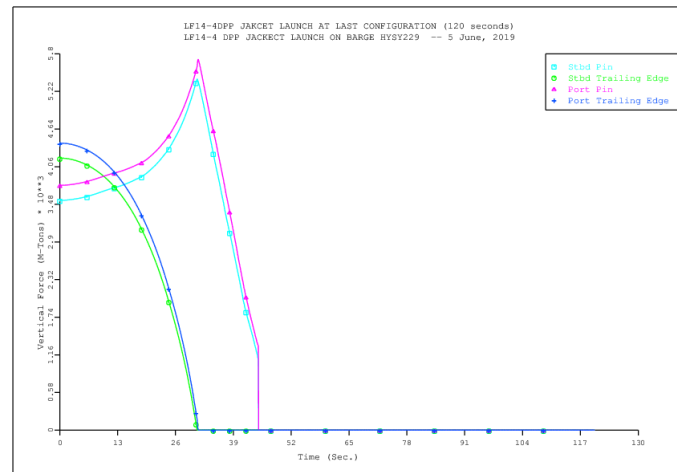
附表 1.6

1. Initial Conditions:	
Barge Draft at Midships (m)	11.11
Trim by Stern of Barge (deg)	4.00
Start time of Sliding (s)	0.00
Pushing Distance (m)	0.00
Jacket Weight (MT)	16264.12
2. When Jacket Tips:	
Time (sec)	31.13
Length of Leg on Deck (m)	61.16
Port Rocker Load (MT)	5716
Stbd Rocker Load (MT)	5368
Total Load on Rocker (MT)	11084
Percent of jacket Weight (%)	68
Jacket Roll Angle (deg)	-0.02
Barge Roll Angle (deg)	-0.02
Jacket Pitch Angle (deg)	5.62
Barge Pitch Angle (deg)	5.62
Max. Relative Speed (m/s)	4.45
3. When Jacket Separates:	
Time (s)	44.70
Port Rocker Load (MT)	1301
Stbd Rocker Load (MT)	1087
Total Rocker Load (MT)	2388
Percent of jacket Weight (%)	14
Jacket Roll Angle (deg)	-0.20
Barge Roll Angle (deg)	-0.10
Jacket Pitch Angle (deg)	25.02

Barge Pitch Angle (deg)	4.77
Max. Relative Speed (m/s)	6.26
4. Maxima/Minima:	
Max jacket Dive Depth @ Top (m)	89.94
Max. Barge Keel Submergence (m)	21.53
Min. Seafloor Clearance (m)	54.09



附图1.6(2) 导管架滑移下水过程中的泥面间隙



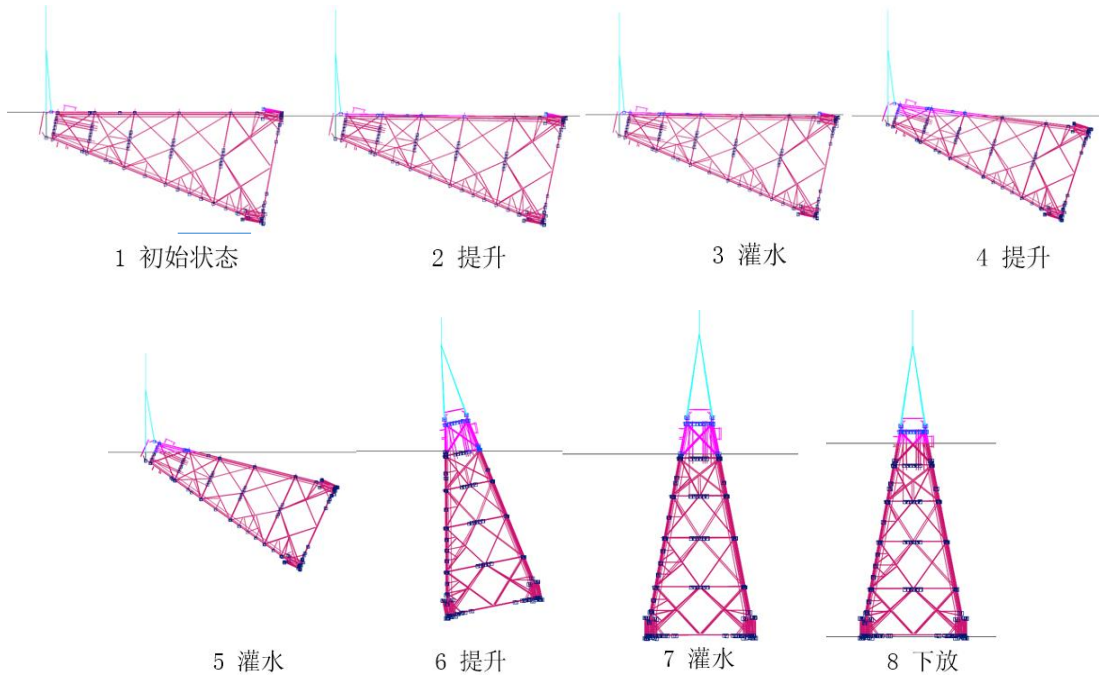
附图1.6(3) 导管架滑移下水过程中的摇臂支反力

1.7 利用 SACS 软件对导管架进行结构强度校核。选定工况下的导管架浮力、重力、摩擦力、支撑力和水动力结果均由 MOSES 软件输出。

1.8 除此之外，还需对下水倾角，滑动摩擦系数，重心偏移和重量的误差，进行敏感性分析。

第 2 节 导管架扶正分析示例

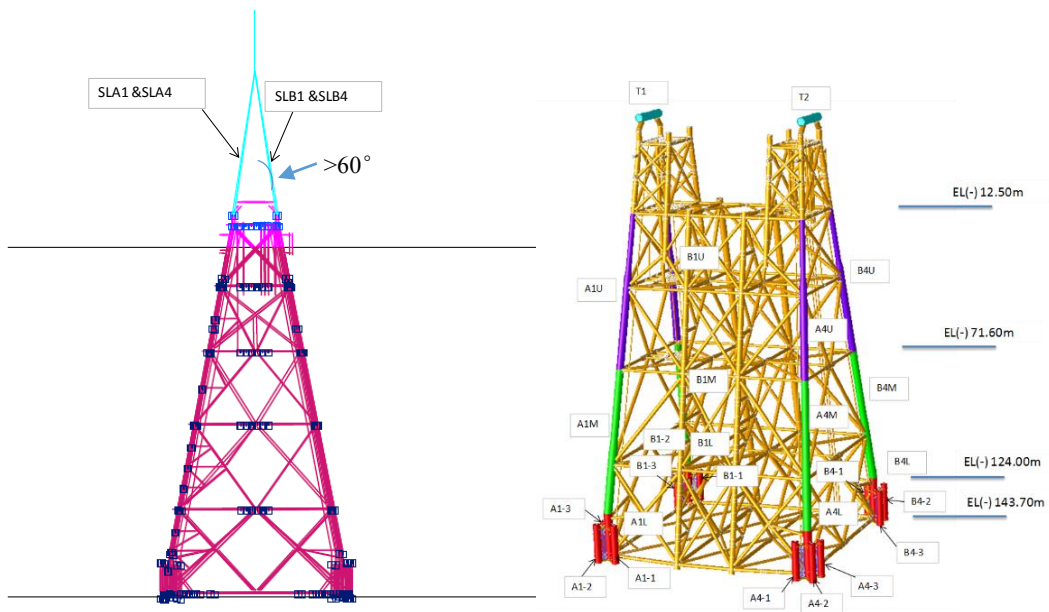
2.1 导管架扶正过程如附图 2.1 所示。



附图2.1 扶正过程示意图

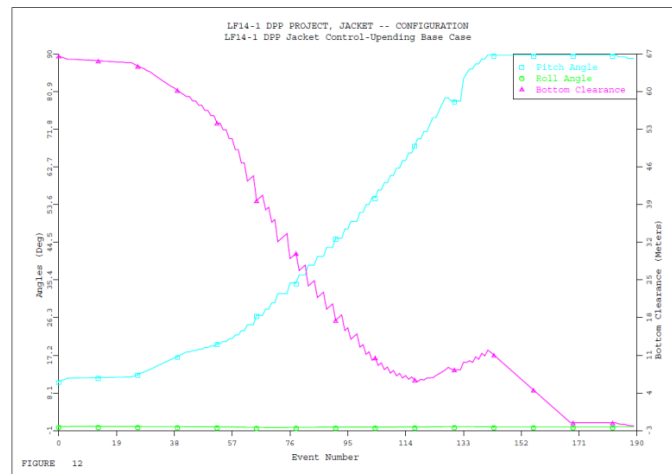
2.2 以某典型深水导管架为例，给出用 MOSES 软件进行扶正分析的算例。

2.3 导管架分舱和吊索的模拟如附图 2.3 所示。

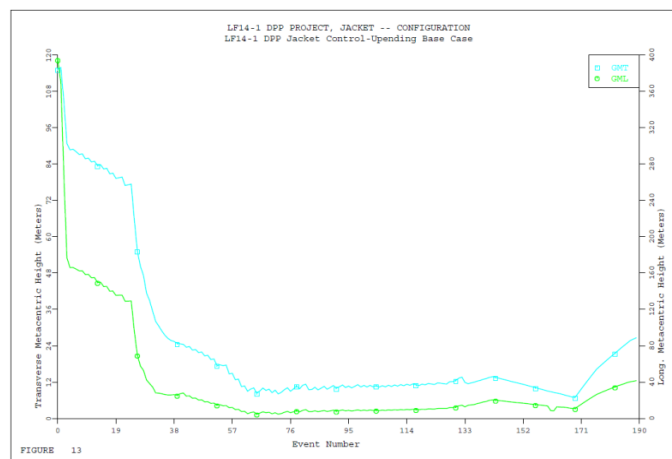


附图2.3 扶正分析模型

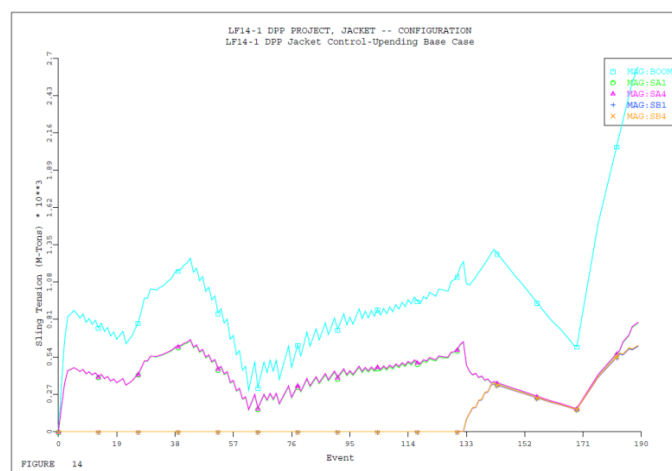
2.4 扶正过程中导管架的轨迹、稳性和吊索力模拟结果见附图 2.4(1)~附图 2.4(3)，根据 6.2 节的分析准则校核分析结果。



附图2.4(1) 扶正过程中导管架的横/纵摇角和泥面间隙



附图2.4(2) 扶正过程中导管架的横/纵稳性高



附图2.4(3) 扶正过程中吊机吊点力和吊索拉力

第 3 节 浮托安装的气候窗口分析示例

3.1 以某深水导管架平台浮托安装的气候窗口分析为例。该油田位于南中国海珠江口海域，水深为 99.8 米，该海域浮托安装环境条件见附表 3.1。

浮托安装限制环境条件

附表 3.1

方向	波高 Hs (m)	流速 (m/s)	风速 (m/s)
迎/随浪	1.50	0.45	9.83
斜浪	1.00	0.45	9.83
横浪	0.50	0.45	9.83

3.2 应选择可作业天数超过 50% 累计概率的月份进行浮托安装，由附表 3.2(1)可见，可操作月份为四月、五月和六月，而最佳操作月份为五月。该海域进入 8 月后，为台风频发期，因此该项目宜在 8 月前完成浮托安装作业。该海域五月份风浪流的大小和方向的联合分布如附表 3.2(2)~附表 3.2(4)所示。

可操作概率计算表

附表 3.2(1)

月份	风速可操作概率 (%)	波浪可操作概率 (%)	海流可操作概率 (%)	可操作概率 (%)
四月	95.15	83.69	98.39	78.35
五月	95.52	89.34	95.25	81.28
六月	96.30	65.48	88.47	55.79
七月	84.01	60.74	87.65	44.73

有义波高和浪向的联合分布（五月）

附表 3.2(2)

Significant Wave Height(m)	Wave Direction																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0.0-0.5	0	0	0.2	1.03	11.22	4.03	1.43	1.84	2.22	0.92	0.13	0	0	0	0	0	23.03
0.5-1.0	0.13	0.2	0.56	7.97	23.66	8.47	3.02	3.23	5.58	7.53	1.68	0.13	0.04	0.04	0	0.07	62.32
1.0-1.5	0.11	0.18	0.2	4.35	2.49	0.76	0.43	0.02	0.02	0.16	1.01	0	0.02	0	0	0	9.74
1.5-2.0	0	0.11	0.25	2.06	0.56	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	3.02
2.0-2.5	0	0	0.07	0.78	0.07	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0.96
2.5-3.0	0	0	0.04	0.18	0.02	0	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0.29
3.0-3.5	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0.07
3.5-4.0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0.07
4.0-4.5	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04
4.5-5.0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04
5.5-6.0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04
6.0-6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.02
6.5-7.0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04
7.0-7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.02
7.5-8.0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.04
8.0-8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.02
8.5-9.0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.04
9.0-9.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.02
9.5-10.0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.04
>10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0.04
Total	0.25	0.49	1.37	16.4	38.04	13.31	4.91	5.15	8.06	8.89	2.82	0.13	0.07	0.04	0	0.07	100
Max(m)	1.2	1.57	3.62	4.09	4.63	6	6.87	9.55	10.08	7.84	1.31	0.91	1.04	0.95	0	0.63	10.08
Mean(m)	0.91	1.11	1.15	1.09	0.66	0.63	0.6	0.66	0.77	0.89	0.88	0.64	0.79	0.75	0	0.6	0.77

风速和风向的联合分布（五月）

附表 3.2(3)

Wind speed (m/s)	Wind Direction(coming)																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0.0-2.0	0.07	0.13	0.25	0.36	0.63	1.21	1.7	0.92	0.92	0.67	0.49	0.54	0.49	0.31	0.11	0.18	8.98
2.0-4.0	0.34	0.45	1.1	2.24	3.38	5.42	5.11	4.66	4.53	2.64	1.64	1.59	1.28	0.45	0.29	0.31	35.42
4.0-6.0	0.38	0.22	1.66	2.62	5.24	4.14	2.53	2.91	4.77	3.43	1.16	1.14	0.58	0.13	0.07	0.2	31.21
6.0-8.0	0.02	0.2	0.6	2.8	3.09	1.25	0.74	0.72	1.72	2.26	1.28	0.29	0.29	0.07	0.02	0	15.37
8.0-10.0	0.02	0.13	0.69	1.16	0.63	0.13	0.09	0.02	0.13	1.12	0.6	0.2	0.07	0.02	0	0	5.04
10.0-12.0	0	0.18	0.31	1.12	0.29	0	0	0	0.02	0.27	0.36	0.09	0	0	0	0	2.64
12.0-14.0	0	0.04	0.16	0.45	0.52	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	1.19
14.0-16.0	0	0.02	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07
16.0-18.0	0	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
18.0-20.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20.0-22.0	0	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
22.0-24.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24.0-26.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26.0-28.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28.0-30.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>30.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	0.83	1.39	4.77	10.8	13.87	12.16	10.17	9.23	12.1	10.42	5.53	3.85	2.71	0.99	0.49	0.69	100
Max(m/s)	8.85	14.26	13.75	20.12	20.04	9.39	8.4	8.01	10.26	12.12	11.92	11.37	9.03	8.01	6.23	5.17	20.12
Mean(m/s)	4.12	5.62	5.81	6.39	5.47	4.04	3.58	3.68	4.29	5.35	5.28	4.13	3.62	3.03	2.73	3.03	4.72

表层流速和流向的联合分布（五月）

附表 3.2(4)

curr. Speed (cm/s)	Current Direction																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
00≤10	0.83	1.25	1.01	1.16	1.03	0.85	0.81	0.81	0.81	0.63	0.29	0.52	0.78	0.69	1.12	1.1	13.69
10≤20	3.07	2.73	2.44	2.53	2.69	2.78	1.72	1.57	1.57	1.1	0.52	0.78	1.23	1.86	2.26	2.15	31
20≤30	3.07	3.65	3.49	2.51	2.28	2.2	1.61	1.3	0.87	0.52	0.56	0.74	1.1	1.59	2.26	3.05	30.8
30≤40	2.35	2.02	1.39	1.14	1.23	1.1	0.96	0.63	0.45	0.11	0.13	0.18	0.43	1.01	1.66	1.9	16.69
40≤50	0.74	0.49	0.31	0.2	0.34	0.87	0.31	0.09	0	0	0	0.04	0.22	0.52	1.08	0.94	6.16
50≤60	0.34	0.07	0	0	0.09	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0.02	0.13	0.27	0.38	1.34
60≤70	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.07	0.11	0.27
70≤80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.04
80≤90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90≤100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100≤120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120≤140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140≤160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160≤180	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180≤200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	10.44	10.22	8.65	7.55	7.66	7.82	5.44	4.39	3.7	2.35	1.5	2.26	3.79	5.85	8.71	9.68	100
Max (cm/s)	63.07	56.39	47.99	49.87	52.75	50.93	50.11	47.79	38.39	33.22	35.19	43.38	57.46	61.42	64.25	72.92	72.92
Mean (cm/s)	25.13	23.06	22.07	20.79	21.77	22.86	21.7	20.06	17.34	15.58	18.2	17.91	20.13	23.78	25.33	26.43	22.58