

# FSRU再气化模块吊机托架结构设计与研究

刘立维

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

**摘要：**再气化模块是FSRU实现将超低温液态天然气转换成常温气态天然气最为核心的功能模块，其一般布置于船舶艏部。同时，FSRU一般需要在再气化模块附件安装甲板吊机，以方便再气化模块设备和零件检修。甲板吊机不使用时，需要有结构支撑其吊臂，本文将基于某FSRU项目，设计和研究其甲板吊臂托架结构，使其满足使用要求。

**关键词：**再气化模块；吊机；托架；受力

## 引言

FSRU再气化模块所配置的甲板吊起吊能力比较强，且吊臂位于模块顶部较高位置和处于风险较大的可燃气体区域，因此对于吊臂搁架的要求比较高。同时，FSRU一般兼顾航行LNG船功能，在波浪作用下，位于较高位置的吊臂搁架垂向加速度较大，且存在侧向加速度，一定程度增大了吊臂搁架的设计难度。本文将基于某FSRU新安装的甲板吊，设计和分析满足要求的吊臂搁架结构。

## 1 吊机托架设计

### 1.1 甲板吊机基本参数

本项目选用的甲板吊为意大利某知名品牌，其最大起重能力60吨，最大吊幅25米。吊机机房距离甲板27米，距离基线53米。吊臂为桁架构架，长度30米，宽度2.2米，最大宽度2.7米。吊机主要参数如表1所示。

### 1.2 托架布置

吊机与再气化模块顶层甲板关系如图1所示，甲板最前沿距离筒体中心约20.5米，吊臂总长约29.8米，吊臂下沿距离再气化模块顶层甲板高度约7.5米。考虑该吊臂自

重较大，位置较高，施加给托架的力较大，同时综合再气化模块顶层甲板下部支撑结构，托架位置初步定在顶层甲板左前角处，此时吊臂与船中心线夹角为 $9.56^\circ$ ，托架中心距离吊机筒体中心约20.3米。

吊机布置时，为避免吊臂进入再气化模块为危险区域，吊臂整体需上翘调整，调整后其中心线与水平面夹角 $4^\circ$ ，综合吊臂首部收缩线型，吊臂搁架搁板处角度为 $9.42^\circ$ ，搁板距再气化模块顶层甲板高度8.3米。托架具体位置如图2所示。

表1 吊机主要参数

钩头行程	75m
回转速度（满负荷）	0~0.5 rpm
回转角度	$320^\circ$
横倾角度	$\pm 2.5^\circ$
纵倾角度	$\pm 1^\circ$
最大操作风速	15m/s
吊臂搁置时风速	63m/s

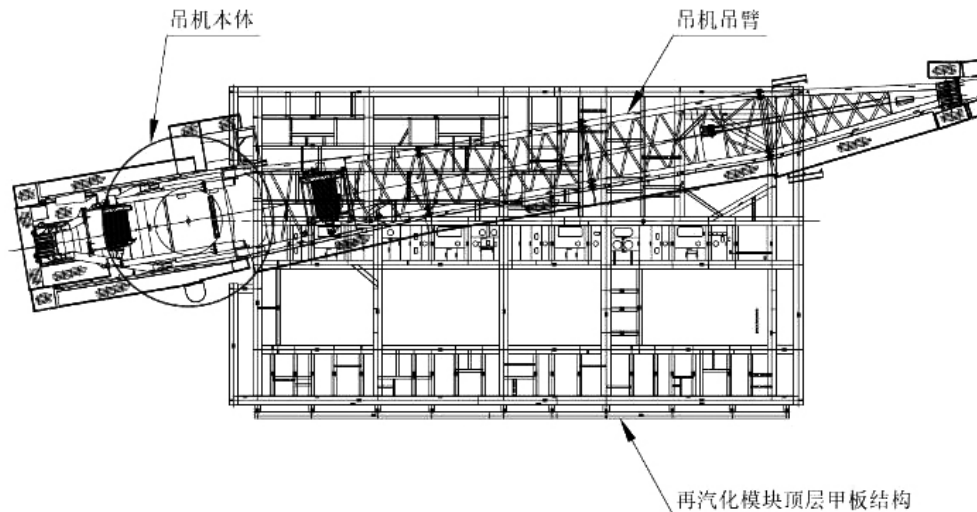


图1 吊机与再气化模块相对位置

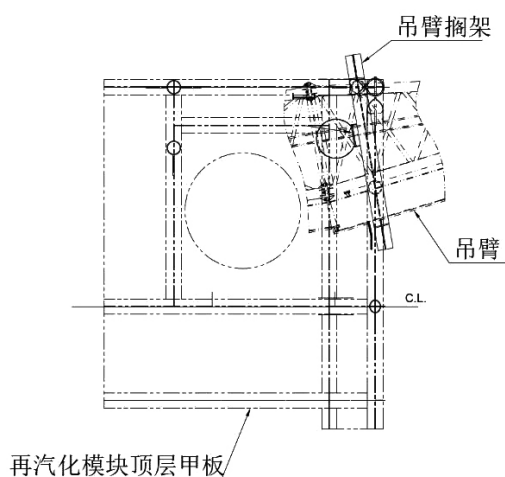


图2 吊臂托架布置

## 1.3 托架结构样式

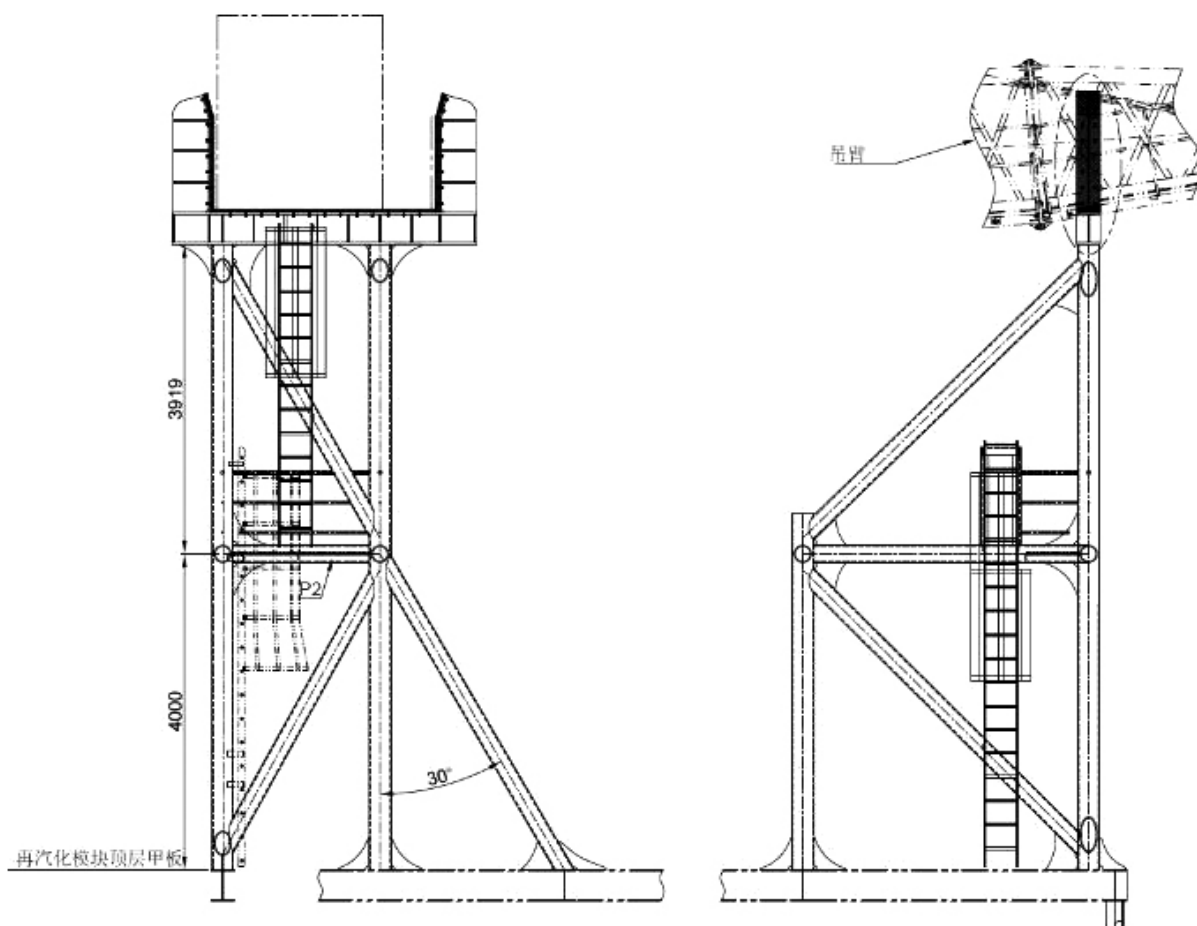


图3 吊臂托架结构形式

由于吊机托架属于次要构件，无需遵循再气化模块主体结构材料采用SS316L原则，采用高强度管材。其中，所有支腿使用 $\text{O}273$ 钢管，所有横撑及斜撑使用 $\text{O}219$ 钢管。

综合吊臂托架所处位置、再气化模块结构特点以及与中心线角度和开槽宽度，拟采用钢管桁架结构为托架本体结构，同时需避开顶层甲板布置的各再气化设备和逃生路线虚拟空间。吊臂搁置在托架上时，其沿吊臂纵向力较大，因此该方向结构结构需要强化。同时也存在侧向摆动的力，托架侧向需考虑适度加强。

综合以上考虑，吊机托架采用两层桁架结构，甲板至4米高处为第1层，4米高到托架搁板为第2层。第1层采用4支腿稳定结构，前后间距4米，靠艏部两支腿横向间距1.96米，靠尾部支腿横向间距1.2米。第2层采用双立柱加斜撑形式，艏部两支腿继续向上延伸，形成吊臂搁板的主支撑结构，后向（即纵向）使用斜撑落在尾部支腿上，同时主支撑结构在横向增加斜撑，斜撑角度 $30^\circ$ 。具体形式如图3所示。

## 2 托架结构有限元分析

## 2.1 托架及其支撑结构有限元模型

支柱、斜撑和肘板结构采用了板单元进行模拟，与托架相连的再气化模块结构同样使用板单元进行模拟，而其

他结构则使用梁单元模拟。再气化模块本体结构网格单元为0.5m×0.5m，吊机托架结构网格单元为0.05m×0.05m。为检查屈曲利用率，单独生成包括再气化模块结构和托架结构的梁单元模型。有限元模型详见图4。

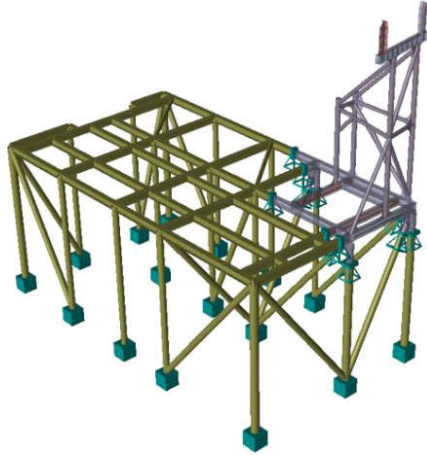


图4 再气化模块顶层甲板及吊机托架有限元模型

模块所有结构材质均为AISI 316L，而吊机托架材质均为AH36高强度钢，其材料属性如表2所示。

表2 材料参数

材质	最小屈服强度	弹性模量	泊松比	密度
	(Pa)	(Pa)		(kg/m <sup>3</sup> )
AISI 316L	1.70E8	2.00E11	0.4	7.98E3
AH36	3.55E8	2.06E11	0.3	7.85E3

2.2 载荷状况

吊机托架主要承受了如下几种载荷<sup>[1]</sup>：

- ✓ 自重；
- ✓ 惯性载荷；
- ✓ 吊机吊臂产生的支反力

2.2.1 自重

除梯子、栏杆、平台和垫板外，所有其他托架结构均建有有限元模型，托架自重将通过有限元软件基于-9.81m/s<sup>2</sup>重力加速度和1.1倍材料系数计算得出。

2.2.2 惯性载荷

加速度取值参考船级社相关规范<sup>[4]</sup>要求，同时需要注意的是，除了Ay之外，迎浪方向的Ax和Az都比横浪方向的大。因此，如果将迎浪方向的Ay设置为0.81，则迎浪方向的加速度可以覆盖斜浪方向的加速度。基于此，本报告仅考虑了迎浪方向和横浪方向，如表3所示。

表3 吊机托架加速度

加速度 (m/s <sup>2</sup> )			
方向	Ax	Ay	Az
迎浪方向	2.37	0.81	7.60
横浪方向	0.12	9.69	3.18

2.2.3 吊机吊臂支反力

根据吊机厂家提供的信息，吊机吊臂搁置于托架时根据2个标准计算出2种不同的支反力，计算时取其大值用于吊臂托架强度分析，如表4所示。考虑吊机吊臂与托架之间的相对运动，需考虑反作用力产生的摩擦力，摩擦系数取0.3。

表4 支反力和摩擦力

项目	侧向载荷	垂直载荷
	(KN)	(KN)
支反力	152	280
摩擦力	45.6	84

2.2.4 组合载荷

对于不同方向的惯性载荷、风力和反作用力将导致不同的强度响应，因此考虑8种载荷工况，如表5所示。

表5 组合载荷

载荷种类	组合载荷								
	LC 01	LC 02	LC 03	LC 04	LC 05	LC 06	LC 07	LC 08	
自重	1	1	1	1	1	1	1	1	
惯性载荷 迎浪	Ax	1	-1	0	0	1	-1	0	0
	Ay	1	1	0	0	1	1	0	0
	Az	-1	-1	0	0	-1	-1	0	0
惯性载荷 横浪	Ax	0	0	1	1	0	0	1	1
	Ay	0	0	1	1	0	0	-1	-1
	Az	0	0	-1	-1	0	0	-1	-1
纵向风力	1	-1	0	0	1	-1	0	0	
横向风力	0	0	1	1	0	0	-1	-1	
横向支反力	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	
垂向支反力	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
纵向摩擦力	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	

### 2.3 边界条件

再气化模块甲板各连接边缘结构假定为固定支撑，其边界条件如图5所示。

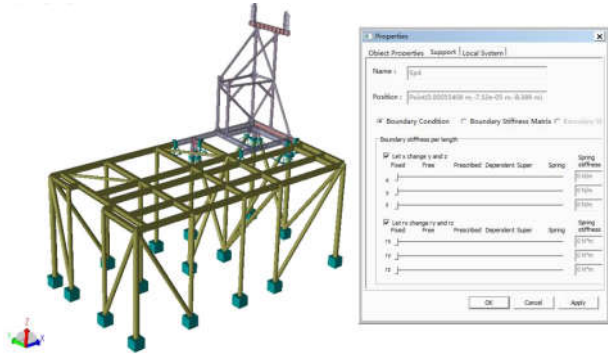


图5 有限元模型边界条件

### 2.4 许用应力

根据英国劳氏船级社规范<sup>[2]</sup>要求，许用应力如表6所示。

表6 许用应力

许用应力种类	安全系数	许用应力 (Pa)	
		316L	AH36
板Von Mises应力 (组合应力)	1.11	153	320
板剪切力	1.89	90	188
梁轴向应力 (拉伸/压缩)	1.25	136	284
梁弯曲应力	1.25	136	284

### 2.5 分析结果

#### 2.5.1 屈服强度核查

吊机托架如表7所示，应力分布图如图6和图7所示。

表7 吊臂托架屈服应力检查结果

载荷工况	Von-Mises 应力		剪切应力	
	实际应力	许用应力	实际应力	许用应力
	MPa	MPa	MPa	MPa
LC 01	196	320	81	188
LC 02	211	320	-89	188
LC 03	196	320	83	188
LC 04	208	320	-82	188
LC 05	239	320	83	188
LC 06	227	320	89	188
LC 07	227	320	-76	188
LC 08	223	320	83	188

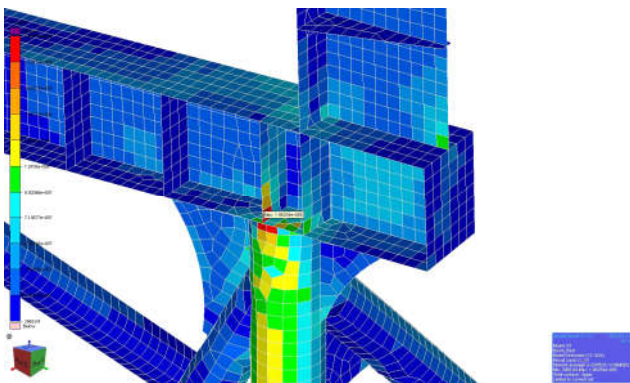


图6 吊机托架Von Mises应力

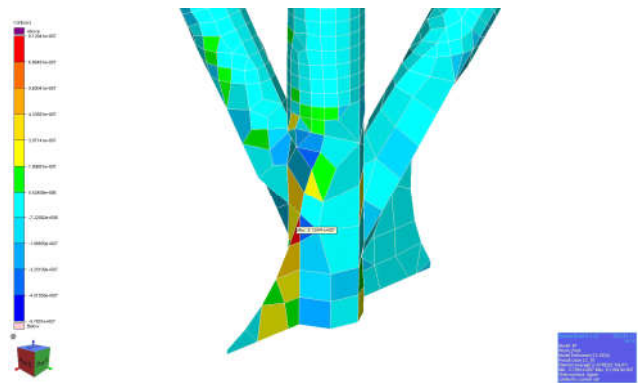


图7 吊机托架剪应力

#### 2.5.2 屈曲核查

根据EN1993-1-1的要求，对拖架和再气化模块结构的支柱和撑杆的屈曲强度进行了检查。每种载荷情况下的所有屈曲效用系数根据相关标准选取，部分应力和检查结果如表8所示。结果表明，所有UF值均小于1.0。

#### 2.5.3 变形量检查

根据规范<sup>[3]</sup>要求，起重机臂架的最大变形如表9所示，结果表明，该起重机吊臂托架结构能够满足起重机运行的变形要求，起重机臂架高度为9.8米。

#### 2.5.4 结论

从屈服验算、屈曲核查和变形结果来看，吊机托架及相邻再气化模块结构能够满足规范对强度要求和使用

要求。

表8 单个构件屈曲检查对比样本

样品编号	D	t	L	屈服强度	轴应力 $\sigma_{xx}$	弯曲应力 $\sigma_{yx}$	弯曲应力 $\sigma_{zx}$	效用系数
	cm	cm	cm	MPa	MPa	MPa	MPa	EN1993
01	35.5	1.75	400	355	-64.77	-11.09	34.47	0.38
02	H40X30X0.8X2		245	170	-3.49	-144.63	-14.31	0.65
03	35.5	1.75	431.9	355	-65.52	-29.06	31.39	0.41
04	H40X30X0.8X2		245	170	-1.18	-125.58	-33.58	0.62
05	H40X30X0.8X2		245	170	4.71	110.35	30.39	0.55
06	H40X30X0.8X2		245	170	-5.28	-109.86	-11.61	0.50
07	H40X30X0.8X2		245	170	2.15	100.86	52.75	0.57
08	H40X30X0.8X2		244	170	-6.13	-82.19	-28.57	0.42

表9 吊机托架最大变形量

载荷工况	最大变形量 (mm)	变形/高度	标准值 (1/50)	安全与否
LC 01	40.10	0.00408	0.02	安全
LC 02	40.17	0.00409	0.02	安全
LC 03	40.48	0.00412	0.02	安全
LC 04	37.56	0.00383	0.02	安全
LC 05	77.16	0.00786	0.02	安全
LC 06	71.58	0.00729	0.02	安全
LC 07	74.52	0.00759	0.02	安全
LC 08	66.25	0.00675	0.02	安全

### 3 结束语

本文根据FSRU甲板吊机布置高度和位置，综合考虑再气化模块结构特点，布置和设计了最大起吊能力为60吨的甲板吊吊臂托架结构。并使用有限元分析软件，对托架及其相邻再气化模块本体结构进行强度和变形分析，各项参数均满足使用要求。

从载荷状况来看，当FSRU仅作为再气化单元功能时，其环境载荷相对固定，要求不苛刻。但如FSRU兼LNGC航行船功能时，考虑其极限生存状况，环境载荷相对要求较高，对应的结构强度需要充分考虑。因此，在设计过程中，尤其需要注意FSRU是否需要兼具航行船功能。

### 参考文献

- [1]LR Rules and Regulations for the Classification of Ships 2019
- [2]LR Code for Lifting Appliances in a Marine Environment 2019
- [3]LR Rules and Regulations for the Classification of Offshore Units 2019
- [4]LR Structural Design Assessment - Primary Hull and Cargo Tank Structure of Liquefied Gas Carriers Fitted with Type B Independent Tanks Primarily Constructed of Plane Surfaces, 2020