

地震载荷工况下 LNG 卸料臂整机结构有限元 分析与应用实践

郝思佳, 肖立*, 邱灶杨, 杨亮, 甄聪, 陈团海

(中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028)

摘要: **目的** 基于大口径卸料臂在备用工况的受力情况, 针对其整机结构进行有限元计算分析和设计优化。**方法** 在建立有限元模型时, 较大程度还原卸料臂的实际运动状态。通过模态分析得到卸料臂结构的振型和固有频率, 为卸料臂的振动特性分析以及地震载荷计算提供依据。分别对 OBE 和 SSE 地震载荷组合作用下的最恶劣工况的卸料臂整机结构进行有限元计算和分析, 得到卸料臂在承受载荷时的应力和变形情况, 完成结构强度校核。**结果** 建立的有限元模型精度较高, 根据有限元计算分析结果, 提出采用柔性滑环替代刚性隔衬优化方案, 可降低管道系统及旋转接头的载荷。指导部分结构的材料优化选型以及结构安全系数强化设计, 并提出加厚钢管壁厚的方案, 提升卸料臂整体结构的安全可靠性。**结论** 该结构形式的卸料臂可满足在地震载荷极限状态的设计要求, 相关研究结果可为自主技术卸料臂设计与工程化应用实践提供技术支持。

关键词: 液化天然气; 卸料臂; 地震载荷; 有限元分析; 结构优化

中图分类号: U462

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)03-0136-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.016

Finite Element Analysis and Application of Complete LNG Unloading Arm Under Earthquake Loads Conditions

HAO Sijia, XIAO Li*, QIU Zaoyang, YANG Liang, ZHEN Cong, CHEN Tuanhai

(CNOOC Gas & Power Group Co., Ltd., Beijing 100028, China)

ABSTRACT: The work aims to carry out a finite element analysis and design optimization for the complete structure of the loading arm based on the stress situation of the large-diameter unloading arm under standby conditions. When establishing a finite element model, the actual motion state of the unloading arm was greatly restored. The vibration mode and natural frequency of the unloading arm structure were obtained through a modal analysis, to provide a basis for analyzing the vibration characteristics of the unloading arm and calculating earthquake loads. In addition, a finite element calculation and analysis was performed on the complete structure of the unloading arm under the worst-case conditions of OBE and SSE earthquake load combinations,

收稿日期: 2024-09-18; 修订日期: 2024-12-12

Received: 2024-09-18; **Revised:** 2024-12-12

基金项目: 中国海洋石油集团有限公司海油众创项目 (HYZC-2022-01-020-QD)

Fund: China National Offshore Oil Corporation Innovation Project (HYZC-2022-01-020-QD)

引文格式: 郝思佳, 肖立, 邱灶杨, 等. 地震载荷工况下 LNG 卸料臂整机结构有限元分析与应用实践[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 136-145.

HAO Sijia, XIAO Li, QIU Zaoyang, et al. Finite Element Analysis and Application of Complete LNG Unloading Arm Under Earthquake Loads Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 136-145.

*通信作者 (Corresponding author)

to obtain the stress and deformation of the unloading arm under load, and finish the structural strength verification. The established finite element model had high accuracy. According to the results of the finite element calculation and analysis, a flexible slip ring was proposed to replace the rigid lining for optimization, reducing the load on the pipeline system and rotating joints; The material optimization selection and structural safety factor enhancement design of some structures were completed under guidance, and a plan was proposed to increase the wall thickness of steel pipes to improve the overall safety and reliability of the unloading arm structure. The unloading arm of this structural form can meet the design requirements under the earthquake load limit state, and the relevant research results can provide a technical support for the design and engineering application of independent technology unloading arms.

KEY WORDS: liquefied natural gas; unloading arm; earthquake loads; finite element analysis; structure optimization

液化天然气 (LNG) 卸料臂直立安装在 LNG 接收站码头, 其口径通常为 16 in (40.64 cm) 或 20 in (50.8 cm)。大型 LNG 接收站通常配置的 5 台套大口径卸料臂, 是 LNG 进入接收站的第一步^[1], 主要作用是将船上的 LNG 输送至低温储罐, 维持系统压力平衡, 并进行 LNG 返输装船, LNG 经由两级泵输送系统、气化外输系统等环节输送至下游用户^[2]。作业时, 卸料臂要适应恶劣的海洋环境, 且承受 LNG 的超低温考验, 技术难度远高于传统常温流体装卸装置^[3]。进口卸料臂存在价格昂贵、供货周期长、服务响应慢等问题, 严重制约了 LNG 行业的健康发展。实现大口径岸基卸料臂自主研制及应用, 对于提升 LNG 接收站关键技术核心竞争力具有重要意义。

卸料臂有限元分析是设计卸料臂的难点问题, 有限元计算分析方法能够考虑结构的不规则性、计算精度高, 在特定荷载作用下, 以结构的变形和等效应力判断力学性能是否满足工程设计应用需求^[4]。目前, 针对卸料臂的数值模拟研究主要集中在结构设计、风载作用和管道流动分析等方面, 而基于 LNG 卸料臂整机结构有限元分析与应用的研究鲜有报道。苏荣华等^[5]研究了破碎站卸料臂的结构仿真与优化, 分析得出结构始端处横梁为结构薄弱点, 通过改变横梁截面, 提高设备的承载能力。黄卫东等^[6]分析了输油臂在风载作用下的数值模拟结果, 并对支承箱进行合理的改进。Kim 等^[7]对 LNG 卸料臂在风载作用下进行了可靠性分析, 并通过灵敏度分析考虑材质对结构稳定性的影响。Song 等^[8]根据不同操作模式所需的设计载荷条件, 评估了原油装卸臂初始设计的结构安全性, 提出了对局部构件加固的方式进行结构优化。梅杰等^[9]分析了 LNG 卸料臂管道在低温作用下的温度分布和受力等特性, 得出管道强度符合使用要求的结论。Mcpheal 等^[10]针对海上装载臂, 考虑了载荷、系泊配置等多种组合因素, 开展了风洞建模、波浪盆地建模等模拟工作, 通过时域模拟来评估实际操作的可性。

本文基于国内某项目自主研发的 LNG 大口径卸料臂, 通过研究卸料臂备用工况下的受力情况, 针对其整机结构进行有限元计算分析, 并给出设计优化建议,

为自主技术卸料臂设计与制造提供理论参考与指导。

1 卸料臂有限元模型

1.1 模型建立、简化与应用

当 LNG 未卸船时, 卸料臂在初始复位的状态(空载且不工作), 称为备用状态, 如图 1 所示。在地震条件或者台风极端条件下, 其安全性能直接影响到 LNG 接收站的安全操作与现场运行, 在进行设计与有限元分析时, 有必要考虑极端天气的影响^[11]。LNG 接收站运维期间, 卸料臂处于备用工况的状态周期较长, 针对备用工况下的整机结构进行计算分析, 能够有效进行卸料臂的安全稳定评估。



图 1 卸料臂备用状态

Fig.1 Stowed state of unloading arms

LNG 卸料臂结构复杂, 为便于计算和收敛, 在建立有限元模型时, 首先应对局部结构进行等效简化处理。在满足计算精度的前提下, 对模型进行简化。

1) 卸料臂通过调整配重实现平衡, 可考虑省略配重块、下绳轮结构。通过在相应节点施加集中质量的方式考虑上述结构的质量^[12], 在如图 2a 所示的参考点 RP-5 处施加等效载荷。

2) 旋转接头属于球轴承结构, 能够在不同的工作状态下自由转动^[13]。在保留运动副关系的基础上, 对旋转接头进行了简化处理, 保持其结构的自由度, 如图 2b 所示。

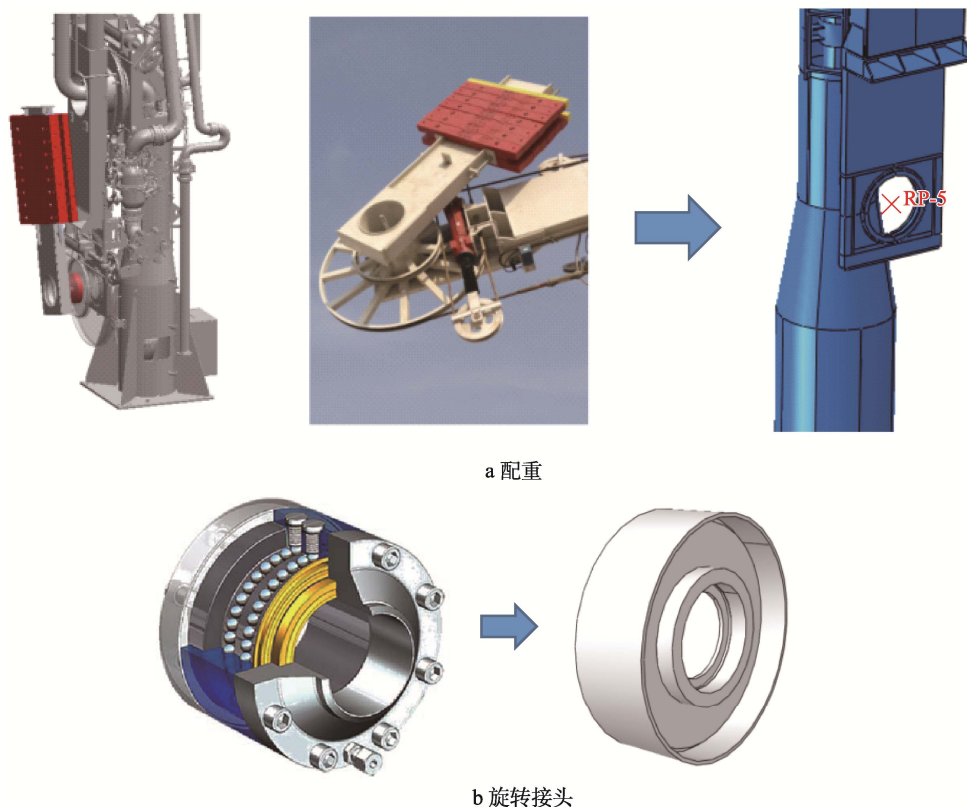


图 2 卸料臂局部结构有限元模型简化

Fig.2 Simplified finite element model of local structure of unloading arm: a) counterweight; b) revolute joint

LNG 卸料臂主要包括独立支撑结构和管道结构等,前者包括立柱、转轴箱、内臂支撑和外臂支撑等,后者则包括内臂、外臂、旋转接头、三维接头等^[14]。立柱是支撑整个卸料臂的垂直结构件,通过立柱底板安装的地脚螺栓将卸料臂固定在码头上。在有限元分

析中,假设立柱底板为固定支座。本文考虑了卸料臂不同部位的材料特性影响,主要有独立支撑结构(Q355D)、管道结构(304/304L),并考虑了介于2种结构中间的柔性缓冲材料——绝热垫片(PF CC 202)^[15]的材料特性,性能参数见表1。

表 1 卸料臂材料属性

Tab.1 Material properties of unloading arm

材料	杨氏模量/MPa	密度/(g·cm ⁻³)	泊松比	导热系数/(W·m·°C ⁻¹)	屈服强度 σ_s /MPa
Q355D	206 000	7.85	0.3	50	355
304/304L	189 000	7.93	0.3	15	205
PF CC 202	7 000	1.40	0.3	5	—

建立卸料臂整机有限元模型时(如图3所示),以立柱底面中心为坐标系原点O,并遵循笛卡尔直角坐标系,其中y方向即与码头面平行的方向。为有效提升建模网格质量,采用分割模型的方式划分网格,主要采用C3D8R单元和C3D4单元。整个模型节点数为230 678,单元数为542 865个,网格划分如图4所示。

通过建立接触属性,设置切向属性的摩擦系数、法向属性(硬接触),对力学接触属性进行定义,模拟管道在实际运动中的自由滑动。采用绑定、耦合等连接方式对有限元模型进行封装。为确保管道在承受冷热应力时能自由伸缩和滑动,针对卸料臂独立支撑部分和管道部分的接触区,包括支撑箱与管道、立柱

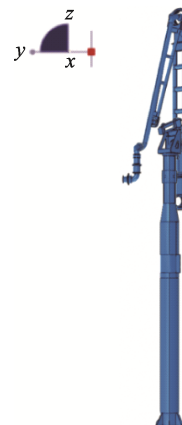


图 3 卸料臂整机模型

Fig.3 Finite element model of complete unloading arm



图 4 卸料臂整机结构网格划分 (局部)
Fig.4 Meshing of complete unloading arm structure (local): a) pipe; b) support structure; c) column

内的管道导向支撑与管道等区域, 提出采用柔性滑环 (图 5 中绿色部件, 即 PF CC 202 材料) 替代刚性隔衬的方式, 作为绝缘垫块和隔冷层, 使得卸料臂设计为独立支撑结构的同时, 保障实际工作状态为柔性连

接。根据有限元计算结果和实际应用效果来看, 该柔性滑环方案应用良好, 能够支撑并分散结构自重和流体负荷, 并承受管道系统内部压力和温度变化导致的伸缩变形, 缓解管道应力^[16]。

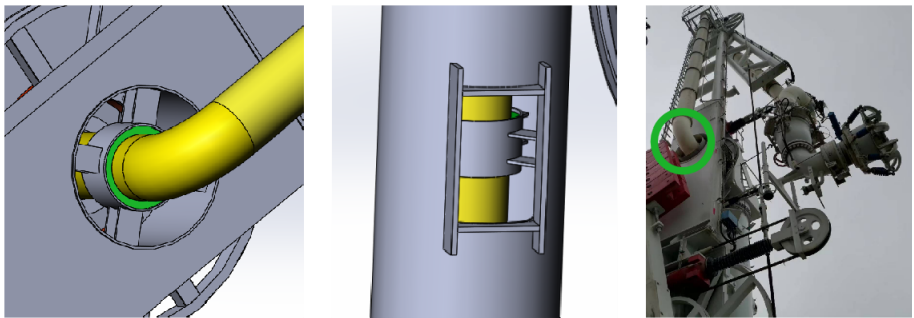


图 5 卸料臂支撑结构和管道柔性滑环连接方案及应用
Fig.5 Connection scheme and application of unloading arm support structure and pipeline flexible slip ring

1.2 载荷施加

1.2.1 模态分析

模态分析是动力学分析的基础, 可用于评估卸料臂在无载荷时的振动特性 (固有频率和模态振型)^[17]。不同阶的模态对响应的贡献度不同, 而低阶模态的响应所占权重往往较大, 可以更有效反映设备的振动情况^[18-19]。利用 Lanczos 求解器进行计算, 随着卸料臂自振阶数的逐级增加, 整机结构在自重作用下出现振动变形, 其特征值和自振频率也依次增大。

当放大振型结果的若干倍变形系数时, 可发现卸料臂管道产生明显的变形 (如图 6 所示), 变形明显的位置集中在外臂内臂连接处、弯管、管口处。1 阶

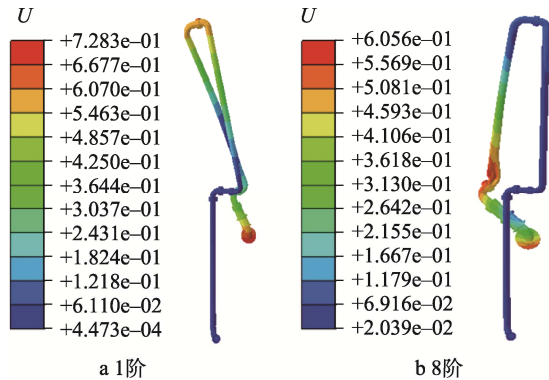


图 6 卸料臂管道模态振型图 (局部)
Fig.6 Modal vibration of unloading arm pipeline (local): a) the first mode; b) the eighth mode

模态变形明显,外臂主要表现为沿 y 轴扭转,变形较为明显,此时固有频率为 0.435 9 Hz。8 阶模态图中,外臂接近三维接头的局部产生剧烈的压缩变形。

独立支撑结构的变形如图 7 所示。可以看出,立柱变形较小,外臂支撑部分以 z 轴为转轴左右摆动,最终趋于 y 轴方向变形。7 阶模态图变形明显,内部支撑主要表现为沿 y 轴偏移和扭转,并产生 S 形变形,变形程度较为剧烈,此时固有频率为 1.237 4 Hz。由此可以看出,卸料臂立柱、转轴箱、管道内臂的稳定性较好。通过联合分析地震力作用方向下的振型和固有频率,计算了卸料臂的地震载荷。

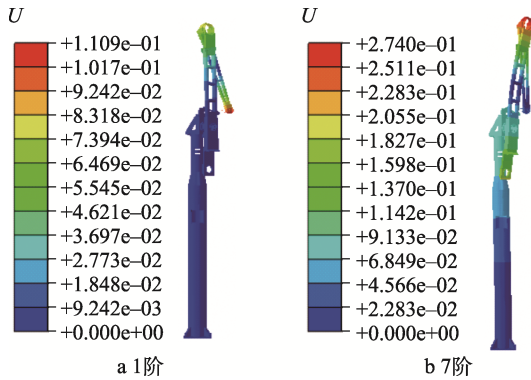


图 7 卸料臂独立支撑结构模态振型图(局部)

Fig.7 Modal vibration of independent support structure of unloading arm (local): a) the first mode; b) the seventh mode

1.2.2 地震载荷

按照规范 BS EN ISO 16904^[20]要求,应考虑卸料臂在备用工况且空载作用时的地震载荷(EL),即水平和竖向方向地震载荷的共同作用,并基于操作基准地震(OBE)工况考虑,保证卸料臂在 OBE 工况下正常运行。安全停运地震(SSE)工况对应的是更为极端的地震事件,在保证安全的前提下,卸料臂设备可以不正常运行^[21]。本文综合考虑了 OBE 和 SSE 这 2 种地震工况。

OBE、SSE 工况分别取 50 a 超越概率 10%、2% 的参数来进行计算,地震影响系数标准形式为:

$$S_a(t) = \begin{cases} A_{\max} [1 + 10(\beta_m - 1)T] & T \leq 0.1 \text{ s} \\ A_{\max} \beta_m & 0.1 \text{ s} < T \leq T_g \\ A_{\max} \beta_m (T_g / T)^C & T_g < T \leq 5T_g \\ A_{\max} \beta_m [0.2^C - 0.02(T - 5T_g)] & 5T_g < T \leq 6 \text{ s} \\ A_{\max} \beta_m [0.2^C - 0.02(6 - 5T_g)] & 6 \text{ s} < T \leq 10 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A_{\max}$ 为设计地震动峰值加速度, cm/s^2 ; β_m 为设计地震动力放大系数最大值; T 为反应谱周期, s; T_g 为反应谱拐点周期, s; C 为衰减系数。

响应谱所需的各参数值见表 2。

表 2 频谱参数
Tab.2 Spectrum parameter

工况	$A_{\max}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$		β_m (阻尼比 5%)	T_g/s	C (阻尼比 5%)
	水平	竖向			
OBE	165	107	2.05	0.6	0.9
SSE	315	205	2.50	0.7	0.9

结合 GB 51156^[22]和 GB 50011^[23],卸料臂地震工况下加速度值、地震作用分项系数分别见表 3、表 4。

表 3 卸料臂地震工况下加速度 ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)

Tab.3 Acceleration under earthquake condition of unloading arm ($g=9.8 \text{ m/s}^2$)

结构	工况	水平加速度 绝对值/ g	竖向加速度 绝对值/ g
管道	OBE	0.125 9	0.081 6
	SSE	0.276 0	0.179 7
独立支撑结构	OBE	0.321 9	0.208 8
	SSE	0.706 1	0.459 5

表 4 地震作用分项系数

Tab.4 Partial coefficient of earthquake action

地震作用	水平地震作用 分项系数 γ_{Eh}	竖向地震作用 分项系数 γ_{Ev}
水平为主	1.3	0.5
竖向为主	0.5	1.3

本文有限元分析研究的是以水平方向和竖向方向的地震波为主的 2 种工况,同时也考虑了地震载荷在不同方向的地震作用分项系数以及加速度的方向。水平或竖向地震作用力为(同方向地震作用分项系数) $\times$ (同方向加速度)。经过结果的比对与分析,无论是 OBE 还是 SSE 地震工况,当地震作用形式为水平为主时,且水平地震作用力方向为 y 方向、竖向地震作用力方向为 ($-z$) 方向(与重力方向相反),为地震载荷的最不利工况。因此,在进行卸料臂结构受力分析校核时,将此种工况作为地震载荷的施加方式,用于评估卸料臂在地震危险工况下的稳定性。

2 有限元计算和结果分析

LNG 卸料臂受力复杂,宜采用综合考虑偏应力作用的 von-Mises 应力对结构强度进行校核,计算应力和等效的 von-Mises 应力,计算结果需满足 $\sigma_{\text{von}} \leq \sigma$,从而判断材料在受力时的变形和破坏情况,快速确定模型中的危险区域^[24-25]。

针对不同工况、不同荷载组合下选取不同的应力系数(即 K 值),确定材料的许用应力(即校核基准)。卸料臂在不同工况下都需考虑自重载荷,即规范中要求的静载^[26]。按照卸料臂承载能力极限状态进行荷载

分析 (见表 5), 组合出最恶劣的极限组合工况, K 取 1.2。承压结构的基本许用设计压力 S_d 应选取 $\sigma_s/1.5$ (σ_s 为屈服强度) 和 $\sigma_b/2.4$ (σ_b 为极限抗拉强度) 中的较小值, 得出卸料臂的独立支撑结构和管道结构的 S_d 分别为 236、137 MPa。

表 5 备用工况的基本许用设计应力				
Tab.5 Basic allowable design stress of stowed conditions				
模式	载荷组合	许用应力 $K_c \cdot S_d$	独立支撑许用应力/MPa	管道许用应力/MPa
备用工况	静载 DL+地震荷载 EL	1.2 S_d	283.2	164.4

2.1 OBE 地震载荷工况

在自重载荷和 OBE 地震载荷作用下, 卸料臂受力情况如图 8 所示。管道的最大等效应力为 133.4 MPa, 集中在管道的法兰两端和弯管处; 独立支撑结构的最大等效应力为 190 MPa, 集中在卸料臂内部支撑连接处, 均未超材料的许用应力。

2.2 SSE 地震载荷工况

在自重载荷和 SSE 地震载荷作用下, 卸料臂受力情况如图 9 所示。SSE 和 OBE 这 2 种工况下地震载荷的施加方式基本相同, 应力变化趋势相似, 不同在于加速度在水平和竖直方向的分力大小, 应力结果情况见表 6。

卸料臂管道在不同地震工况的变形云图如图 10 所示 (变形比例因子均设为 5), 可见管道外臂出现了较大的变形, 尤其是内外臂连接处、外臂弯管处和三维接头处等位置。这是因为卸料臂在备用状态未与船体连接, 外臂的管口缺少一定的固定与支撑作用。另外, 管道尺寸较大, 结构不规则部分在受到地震作用力时容易产生变形, 出现应力集中的现象。

卸料臂为非对称结构, 通过调整配重块实现整机平衡及负载传递, 很容易使管道等结构朝某方向发生扭转。因为结构特性而产生偏心载荷, 将会产生弯曲力矩和剪力作用, 导致基底应力的变化, 所以最后通过分析抗震设计中的关键参数, 参考标准 ASCE 7-10^[27], 利用经典力学分析的方式对 OBE 和 SSE 这

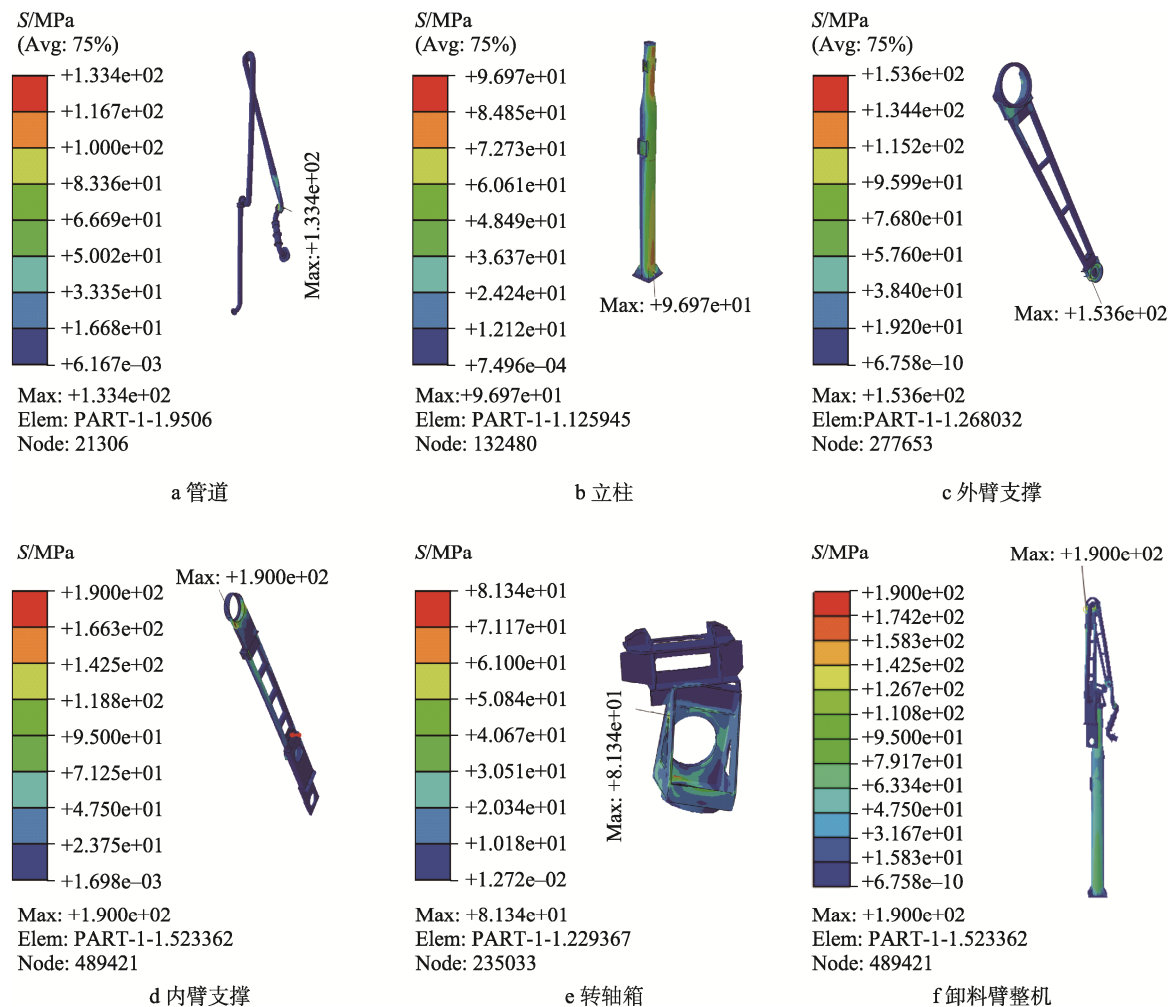


图 8 卸料臂整机结构在 OBE 工况下的受力情况

Fig.8 Stress situation of unloading arm structure under OBE condition: a) pipe; b) column; c) outer arm support; d) inner arm support; e) rotation shaft box; f) complete unloading arm

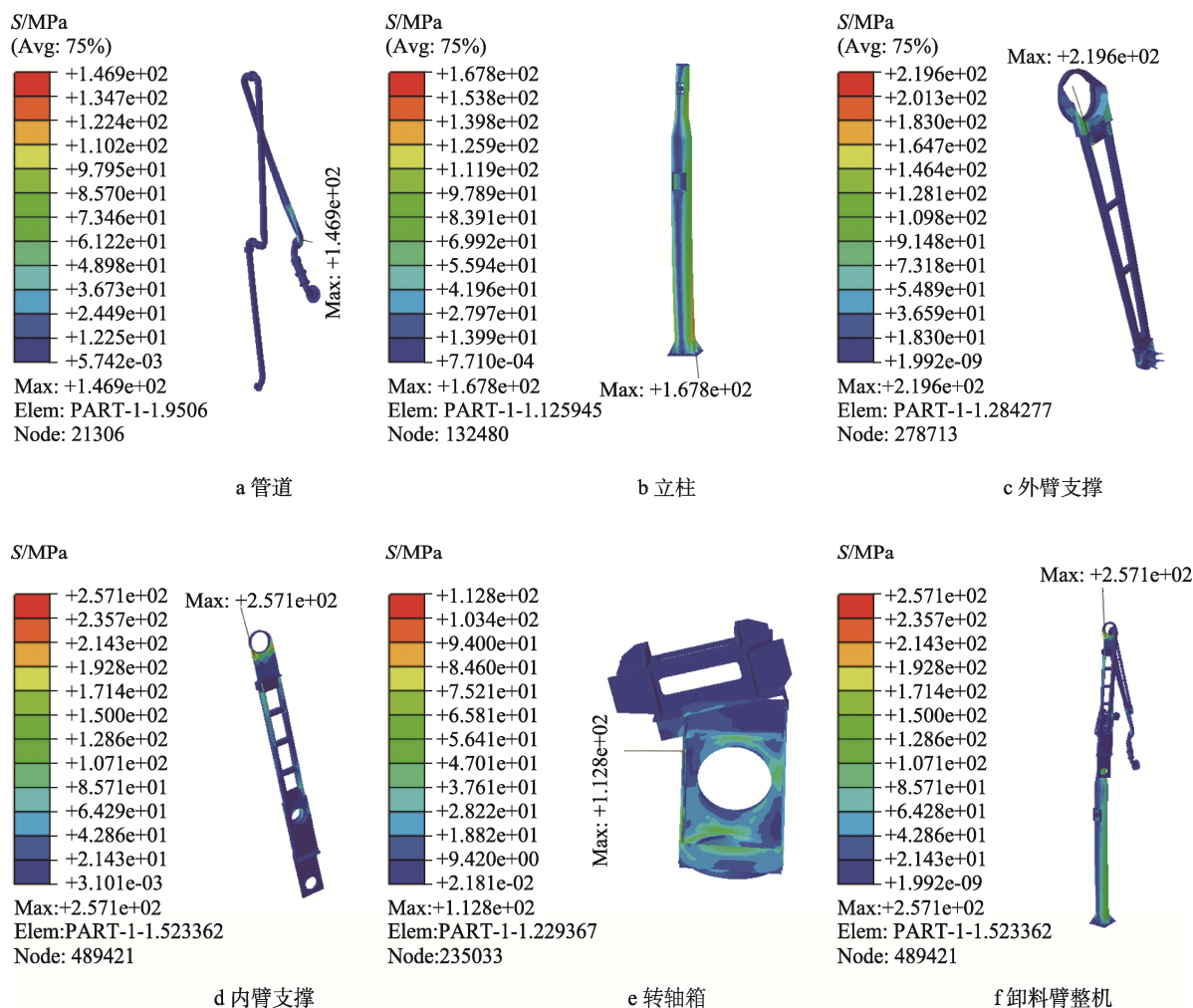


图9 卸料臂整机结构在SSE工况下的受力情况

Fig.9 Stress situation of unloading arm structure under SSE condition: a) pipe; b) column; c) outer arm support; d) outer arm support; e) rotation shaft box; f) complete LNG unloading arm

表6 地震工况最大等效应力对比

Tab.6 Comparison of maximum equivalent stress under earthquake conditions

关键结构	最大等效应力/MPa		许用应力/MPa
	OBE 工况	SSE 工况	
管道	133.4	146.9	164.4
立柱	97.0	167.8	
外臂支撑	153.6	219.6	283.2
内臂支撑	190.0	257.1	
转轴箱	81.3	112.8	

2种地震工况卸料臂受到的弯矩进行了计算,再将其转化为对地脚螺栓进行受力分析。结果表明,螺栓所受的挤压应力小于许用值,卸料臂在地震载荷的作用下可保证其安全稳定性,与有限元分析的结论一致。

本次分析分别对 OBE 地震、SSE 地震载荷作用下最恶劣组合工况的卸料臂整机结构模型进行了有限元分析计算和结果校核。结果表明,卸料臂在 SSE 地震工况所受的最大 von-Mises 应力大于 OBE 地震工况,但仍小于材料的需用应力。该结构形式的卸料

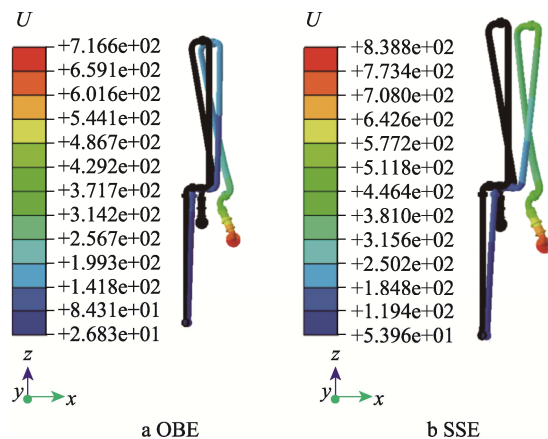


图10 卸料臂管道位移变形云图

Fig.10 Deformation contour of unloading arm pipeline

臂满足在地震作用下极限状态的设计要求。

3 有限元分析应用实践

根据卸料臂有限元分析结果,指导了部分结构的材料优化选型以及结构安全系数强化设计。经上述有

限元模型结果比对, 最大受力情况为 SSE 地震载荷作用下, 结构承受的最大应力为 257 MPa, 其数值仍小于 Q345E 的许用应力 (276 MPa), 所以可将独立支撑主要材料 Q355D 替换为 Q345E 材料, 降低设备材料投资, 其性能仍可以满足强度要求。

从上述分析过程可看出, 卸料臂结构的薄弱位置主要集中在管道外臂 (如旋转接头、三维接头) 等位置, 而且外臂支撑出现局部位置应力集中的现象, 最大应力为 219 MPa。支撑构件受载与驱动主要依靠钢丝绳缆实现, 因此钢丝绳缆的性能是否可靠直接影响卸料臂整体安全。根据 GB/T 8918^[28], 钢丝绳破坏性的拉力试验过程, 在 5 倍设计拉力下, 钢丝绳应先断裂, 而钢丝绳不会从锁头内滑脱。为增强驱动钢丝绳的安全系数, 提出钢丝绳的锁头和钢丝绳模压采用 2 000 t 冷态整体压制工艺 (如图 11 所示), 比常规的 500 t 热缩压制更为安全可靠, 试验测试结果满足规范要求, 保障卸料臂在紧急脱离后不会发生从锁头内滑脱的重大安全事故。



图 11 驱动钢丝绳缆安全系数的加强措施
Fig.11 Enhancement measures of drive wire cable safety factor

管道的变形主要由弯曲导致, 为此需提高管道的抗弯截面矩, 从而提高抗弯性能。目前, 卸料臂外臂支撑和管道的厚度在 10 mm 左右, 可以考虑通过增加截面尺寸、采用高强度材料等措施来提高结构强度。在实际中可以通过加厚钢管壁厚至 12 mm 或以上的方案, 有效提升卸料臂整体结构的稳定性。另外, 可通过设立管道支撑加固系统减缓管道变形与振动。

4 结论

基于自主研发的 LNG 大口径卸料臂在备用工况下的受力情况, 进行有限元计算分析并提出设计优化建议, 结论如下。

1) 提出采用柔性滑环替代刚性隔衬的方式, 通过补偿设计增强管道柔性, 有助于提升卸料臂的使用寿命, 并降低渗漏磨损程度。

2) 通过模态分析得到卸料臂结构的振型和固有频率, 计算出卸料臂的固有频率及其振型, 为卸料臂的振动特性以及结构的优化设计提供依据。

3) 建立的有限元模型精度较高, 进行了卸料臂整机结构在地震组合载荷作用下的有限元分析与校核, 与经典力学分析结果相吻合, 确保卸料臂运行安全。

4) 根据有限元计算分析结果, 提出材料优化选型建议与增强驱动钢丝绳安全系数等措施。采用 Q345E 材料替代 Q355D, 降低材料成本并保证结构受力安全。采用冷态整体压制工艺, 确保钢丝绳性能更为可靠。

参考文献:

- [1] 杨亮, 宋坤. LNG 卸料臂国内设计制造水平现状分析[J]. 石化技术, 2018, 25(7): 19-21.
YANG L, SONG K. Analysis of Domestic Design and Manufacturing Level of LNG Unloading Arm[J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(7): 19-21.
- [2] 郝思佳, 许佳伟, 宋坤, 等. 往复式与离心式蒸发气压缩机在液化天然气接收站的应用选型分析[J]. 石油化工设备, 2023, 52(6): 64-68.
HAO S J, XU J W, SONG K, et al. Application and Selection Analysis of Reciprocating and Centrifugal Boiled off Gas Compressors in Liquefied Natural Gas Terminals[J]. Petro-Chemical Equipment, 2023, 52(6): 64-68.
- [3] 陈建新. 16 英寸 LNG 低温装卸臂开发进度计划与控制[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
CHEN J X. Development Progress Plan and Control of 16-inch LNG Cryogenic Loading and Unloading Arm[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [4] 孙承超, 巴文安. LNG 卸料臂国产化的可行性研究[J]. 流程工业, 2022(10): 48-51.
SUN C C, BA W A. Feasibility Study on Localization of Lng Uncharge Arm[J]. Process, 2022(10): 48-51.
- [5] 苏荣华, 马壮, 靳春华, 等. 大型自移式破碎站卸料臂结构仿真与优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(10): 1081-1086.
SU R H, MA Z, JIN C H, et al. Simulation and Optimization for Unloading Arm Structure of the Large Scale Self-Moving Crushing Station[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2017, 36(10): 1081-1086.
- [6] 黄卫东, 王利民, 黄立亚, 等. 输油臂风载的数值模拟分析[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(4): 85-87.
HUANG W D, WANG L M, HUANG L Y, et al. Numerical Simulation Analysis of Wind Loads on Marine Loading Arm[J]. Machine Building & Automation, 2014, 43(4): 85-87.
- [7] KIM D H, LIM J K, KOH J P. Reliability Analysis of LNG Unloading Arm Considering Variability of Wind

- Load[J]. Journal of Korean Society of Steel Construction, 2007, 19(2): 223-231.
- [8] SONG C Y, CHOI H Y, SHIM S H. Structural Safety Evaluation of Marine Loading Arm Using Finite Element Analysis[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2013, 27(1): 43-50.
- [9] 梅杰, 冯武卫, 徐杰, 等. LNG 卸料臂低温管道热应力及密封性数值分析[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(2): 178-182.
- MEI J, FENG W W, XU J, et al. Numerical Analysis of Thermal Stress and Tightness of Low Temperature Pipe of Lng Unloading Arm[J]. Petro & Chemical Equipment, 2024, 27(2): 178-182.
- [10] MCPHAIL F, AUBURTIN E, VAN HAAFTEN E, et al. Prelude Side by Side Offloading-Quantifying the Qualitative to Assess Economics and Operational Capability[C]// Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 2020.
- [11] OCIMF. Design and Construction Specification for Marine Loading Arms[M]. Fourth Edition. London: Witherby & Co. Ltd, 2019.
- [12] 徐晓东, 孙亮, 陈照和, 等. 基于 Abaqus 的焦炭塔裙座柔性槽疲劳分析[J]. 压力容器, 2022, 39(3): 48-54.
- XU X D, SUN L, CHEN Z H, et al. Fatigue Analysis of Flexible Groove of Coke Drum Skirt Based on Abaqus[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(3): 48-54.
- [13] 顾安忠. 液化天然气技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- GU A Z. Technical Manual of Liquefied Natural Gas[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [14] 陈林斌, 水明星, 叶耀辉. LNG 卸料臂泄漏危害分析及现场处置方案[J]. 天然气与石油, 2015, 33(3): 90-94.
- CHEN L B, SHUI M X, YE Y H. Analysis on LNG Unloading Arm Leakage Hazard and Site Disposal[J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(3): 90-94.
- [15] 全国绝缘材料标准化技术委员会. 电气用热固性树脂工业硬质层压板 第 6 部分: 酚醛树脂硬质层压板: GB/T 1303.6—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Thermosetting Molding Compound for Electrical Industry. Industrial Rigid Laminated Sheets Based on Thermosetting Resins for Electrical Purposes: Part 6: Requirements for Rigid Laminated Sheets Based on Phenolic Resins: GB/T 1303.6—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [16] 孟理华, 刘浩阔, 边智, 等. T 型槽密封结构的有限元分析及试验验证[J]. 装备环境工程, 2020, 17(7): 57-63.
- MENG L H, LIU H K, BIAN Z, et al. Finite Element Analysis and Test Verification of T-Groove Seal Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(7): 57-63.
- [17] 刘锐, 王明毓, 刘时贤, 等. 核安全级管道地震分析的模态组合方法[J]. 压力容器, 2021, 38(3): 49-53.
- LIU R, WANG M Y, LIU S X, et al. Modal Combination Method for Seismic Analysis of Nuclear Safety Pipeline[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(3): 49-53.
- [18] 朱奕锟, 余联庆, 周嘉诚, 等. 基于 ABAQUS 的桁架机器人模态分析[J]. 武汉纺织大学学报, 2022, 35(5): 41-45.
- ZHU Y K, YU L Q, ZHOU J C, et al. Modal Analysis of Truss Robot Based on ABAQUS[J]. Journal of Wuhan Textile University, 2022, 35(5): 41-45.
- [19] 刘彦伯. 旋挖钻机变幅机构的力学特性分析及结构参数优化[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- LIU Y B. Mechanical Characteristics Analysis and Structural Parameter Optimization of Luffing Mechanism of Rotary Drilling Rig[D]. Xi'an: Changan University, 2014.
- [20] BS. Petroleum and Natural Gas Industries-Design and Testing of LNG Marine Transfer Arms for Conventional Onshore Terminals: ISO 16904: 2016[S]. London: BSI Standards Publication, 2016.
- [21] 唐良杰. 大型 LNG 储罐隔震性能及参数研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- TANG L J. Study on Isolation Performance and Parameters of Large LNG Storage Tank[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 液化天然气接收站工程设计规范: GB 51156—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Design of Liquefied Natural Gas Receiving Terminal: GB 51156—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [23] 中华人民共和国建设部、国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [24] 张宇, 张帅, 周邦召, 等. 某储运发箱着陆缓冲特性仿真与试验验证[J]. 装备环境工程, 2024, 21(8): 49-58.
- ZHANG Y, ZHANG S, ZHOU B Z, et al. Simulation and Experimental Verification of Landing Buffer Characteristics of Storage and Transport Launch Box[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(8): 49-58.
- [25] 黄志国, 黄志新, 沈鋈, 等. 基于流固耦合方法的单容液化天然气储罐地震反应谱分析[J]. 压力容器, 2015, 32(4): 45-50.
- HUANG Z G, HUANG Z X, SHEN J, et al. Seismic Response Spectrum Analysis of Single Containment of LNG Storage Tank Based on Fluid-Structure Interaction Method[J]. Pressure Vessel Technology, 2015, 32(4): 45-50.
- [26] 高崇仁, 田文磊, 殷玉枫, 等. 塔机多工况有限元分析并行求解的研究[J]. 机械设计与制造, 2019(3): 242-247.
- GAO C R, TIAN W L, YIN Y F, et al. Study on the Parallel Solution of Finite Element Analysis of the Tower

- Crane under Multiple Working Load Cases[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(3): 242-247.
- [27] MERRITT F S. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures: ASCE/SEI 7-10[S]. America: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 重要用途钢丝绳: GB/T 8918—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Steel Wire Ropes for Important Purposes: GB/T 8918—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.