

文章编号: 1007-7294(2024)06-0843-13

海洋环境中 LNG 多工况转运用 低温软管动力学响应研究

刘云¹, 苏琦², 张尤优², 周伟³, 孙紫麾⁴, 杨建业⁵, 阎军^{2,5}

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室工程力学系, 辽宁大连 116024; 3. 中海石油气电集团技术研发中心, 北京 100028; 4. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300461; 5. 大连理工大学宁波研究院, 浙江宁波 315016)

摘要: LNG 低温软管是液化天然气深远海转运装卸的关键纽带, 保证其安全可靠运行、高效持续作业对于 LNG 输送系统至关重要。LNG 低温软管的主要应用工况有船-船并靠卸料、船-船串靠卸料及船岸加注。针对这些不同的应用工况, 本文开展针对 LNG 低温软管的整体水动力分析和整体布置参数的敏感性分析。以直径为 12 英寸规格的 LNG 低温软管为研究对象, 考虑风、浪、流等复杂海洋环境荷载的联合作用, 采用 Orcaflex 软件对不同应用工况下的 LNG 低温软管进行建模、水动力分析和计算校核, 研究结构的关键响应, 并对低温软管整体线型设计参数及提升速度进行敏感性分析。结果表明: 无论是串靠还是并靠工况, 管长和两船间距增大都会导致曲率极值增大, 张力极值减小; 船岸加注时, 提升速度会使张力极值减小, 曲率极值增大。研究成果可为 LNG 低温软管的设计优化提供理论依据, 并对 FLNG 卸料系统整体布置具有参考意义。

关键词: LNG 低温复合软管; LNG 卸料系统; 水动力; 参数敏感性

中图分类号: TV131.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.06.004

Dynamic response of cryogenic hoses for multi-condition LNG transfer in marine environments

LIU Yun¹, SU Qi², ZHANG You-you², ZHOU Wei³, SUN Zi-hui⁴, YANG Jian-ye⁵, YAN Jun^{2,5}

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Research and Development Center, CNOOC Gas & Power Group Co., Ltd., Beijing 100028, China; 4. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 5. Ningbo Research Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016, China)

Abstract: LNG cryogenic hoses are used for connecting floating structures to transport LNG efficiently and continuously in the process of LNG deep-sea transportation and unloading. Making sure that cryogenic flexible hoses operate safely and reliably is crucial for the LNG mining system. The main application conditions of LNG cryogenic hoses are ship-ship side-by-side (SBS) unloading, ship-ship tandem unloading, and ship-shore refueling. The hydrodynamic analysis and calculation of LNG cryogenic hoses were carried out according to these application conditions, and sensitivity analysis of the global layout parameters of the hoses was performed. The LNG cryogenic hose with a diameter of 12 inches was used as the object of study. Consider-

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 大连市支持高层次人才创新创业项目(2021RD16)

作者简介: 刘云(1988-), 女, 硕士, 工程师;

苏琦(1995-), 女, 博士研究生, 通讯作者, E-mail: suqi@mail.dlut.edu.cn。

ing the combined effects of wind, wave and current marine environmental loads, the LNG cryogenic hose was modeled and subjected to finite element calculations, hydrodynamic analysis and computational checks under different application conditions based on Orcaflex software. The critical response was studied, and sensitivity analysis was performed on the global configuration design parameters of the cryogenic hose and the lifting speed. The results show that increasing the hose length and the distance between the connection points leads to an increase in the curvature extreme value and a decrease in the tension extreme value for both tandem and SBS unloading conditions. The lifting speed decreases the tension extreme value and increases the curvature extreme value during ship-shore refueling condition. The study can provide a theoretical basis for the design optimization of LNG cryogenic hoses and has reference significance for the configuration arrangement of FLNG unloading systems.

Key words: LNG cryogenic hoses; FLNG unloading system; hydrodynamic force; parameter sensitivity

0 引言

天然气作为一种清洁、高效、环保、方便的能源,具备单位热值高、使用价格低、污染物排放少的优势,被广泛应用在工业、农业、民用住宅等多个领域,对于提升经济发展和提高环境质量起着日趋重要的作用。在我国南海海域中,石油储量约有300亿吨,天然气20万亿立方米,堪称第二个“波斯湾”^[1]。南海中的天然气储量多存在于深远海区域,因此南海的天然气开采仍存在多种严峻挑战。为了能够高效经济地开发深远海洋的气田,国际上大多采用浮式液化天然气装置(Floating Liquefied Natural Gas System, 简称FLNG)来实现深海开采、天然气液化、船上液舱储存和复合管道装卸天然气等功能^[2]。FLNG一般通过单点系泊的方式进行定位,并与运输液化天然气的穿梭油轮相结合配套使用,从而实现超远距离、超深水天然气田高效开采和运输。

液化天然气(Liquefied Natural Gas, 简称LNG)是一种易燃易爆物质,由于LNG的温度为超低温(-163℃),一旦发生泄漏,将会引起船体材料的低温脆化,对FLNG的海上作业造成极大的危险。LNG卸料系统是FLNG技术链中最为薄弱的环节^[3]。目前的LNG卸料作业方式主要分为并靠卸料与串靠卸料,如图1所示。并靠卸料时,FLNG与LNG船采用系泊缆和防撞垫并排连接,通过悬跨的低温软管将FLNG上的LNG传输到LNG运输船上。由于两浮体间距离较近,水动力的干扰效应较明显,因此对于应用海况要求较苛刻,通常要求有效波高小于3m。串靠卸料时,FLNG与LNGC距离较远,浮体间通过系泊缆首尾相连,通过漂浮的低温软管将FLNG上的LNG传输到LNG运输船上,此方式系泊与连接的难度较低,对于海况的适应性更强^[4-5]。我国南海的开发环境恶劣,而传统的刚性装卸臂仅适用于温和的近海环境,难以应用于具有风、浪、流等复杂海洋环境荷载特征的FLNG系统^[6]。在浮体间进行LNG卸料传输时,低温软管在重量、柔韧性、耐腐蚀性、隔热性等方面综合优势明显^[7],同时在

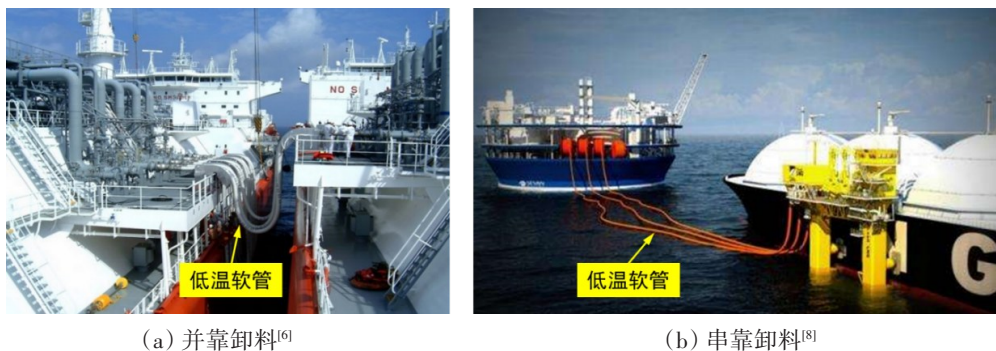
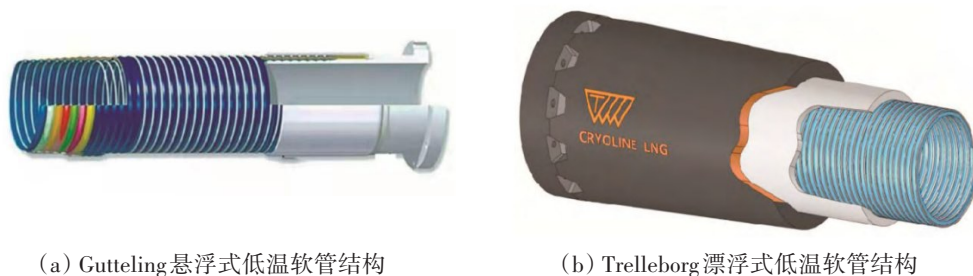


图1 LNG卸料作业工况

Fig.1 LNG unloading operation condition

LNG传输过程中起着纽带作用。保障低温软管的安全性是LNG传输的重中之重。因此,针对不同作业工况下的低温软管开展水动力分析与计算集合,分析其整体的水动力学性能,对保障低温软管安全可靠运行和高效持续作业有重要意义。

LNG低温软管是海洋柔性管道的一种以承受张力为主的柔性细长结构,为LNG输运系统中较为薄弱的环节,且受到的荷载较为复杂。目前低温复合软管的结构形式主要包括悬浮式(主要用于运输船舶卸料,软管悬跨在空中)和漂浮式(主要用于运输船舶、船中卸料,软管漂浮于水上)两种形式(见图2)。2007年2月,Excelerate和Exmar公司在世界上首次采用了荷兰Gutteling公司的悬浮式低温软管,成功地完成了海上LNG的输送作业。2009年,瑞典Trelleborg公司与意大利Saipem公司合作,开发了串联装卸式低温漂浮软管。



(a) Gutteling悬浮式低温软管结构

(b) Trelleborg漂浮式低温软管结构

图2 LNG低温软管典型结构形式^[6]

Fig.2 Typical structure of LNG cryogenic flexible hoses

LNG低温软管作为一种多层多材料的复杂结构,前期的研究多是针对低温软管的局部力学性能开展,研究角度包括材料选择、各层结构设计及层间影响下的组合力学工况响应。现有的设计规范有BS EN 1474-2:2020和BS EN 13766:2010^[9-10]。Witz等^[11]提出了用于LNG传输的一种新型波纹软管,它具有柔性、灵活、重量轻等良好特性。同时介绍了这种新型低温波纹管道的具体结构特征及使用的材料特性,并通过实验验证了这种波纹管道具有较强的适用性;Jaiman等^[12]提出了一种三角型波纹管数值模型,利用计算流体力学软件研究在不同流量、不同湍流模型下管道内部流体的流阻系数、摩擦系数及波纹结构关系;杨志勋等^[13]研究了某类型LNG低温螺旋内衬波纹管的弯曲力学行为,发现尺寸参数对低温波纹管力学性能的影响显著;熊飞宇^[14]研究了某类型LNG低温螺旋内衬波纹管的扭转屈曲力学行为,研究结果表明波纹结构尺寸参数对U型金属波纹管的力学性能和扭转稳定性均影响显著。然而通过低温软管将LNG从FLNG装置传输至LNG运输船的海上作业是近些年才出现的应用场景,因此对于海上卸料与安装等工况下低温软管的整体水动力学分析研究相对较少,而且多是针对低温软管局部力学行为进行研究,分析其不同层的组合响应。

LNG海上转运卸料系统主要包括多浮体系统与低温软管,常见的卸料方式有并靠系统和串靠系统,海洋环境荷载及浮体运动模式对于低温软管的力学响应都有较大影响。目前相关方面的研究多是针对多浮体系统运动响应。赵文华^[4]综合介绍了浮式液化天然气装置(FLNG)的组成、特点、关键技术和发展趋势,表明LNG卸料是FLNG技术链中最为薄弱的环节,并对卸料的并靠及串靠的特点进行阐述,在此基础上提出应加强低温软管技术攻关;王强^[15]针对FPSO-油轮串靠作业多浮体系统,通过频域分析研究了不同系统状态和系统参数对多浮体系统运动响应的影响;阳恒^[16]介绍了并靠系统下低温软管连接和装卸臂连接两种方式,将二者的运转工况、技术、性能和安全性进行了综合对比;郑晓云等^[17]针对在LNG串靠卸料过程中发生泄漏的情景开展分析,预测了LNG泄漏后蒸汽扩散造成的窒息、低温和火灾危害。根据失效模式,由于操作不当或者处于恶劣海况,低温软管会因为负载超过荷载极限而失效。由于多浮体的运动比单浮体的运动更为复杂,对低温软管的动态响应会产生较大影响,而上述研究均未对多浮体系统运动工况下低温软管的水动力响应开展计算分析,此外,低温管道的安装连接作为一种特殊工况也鲜有研究。因此,本文考虑在位工况下的船-船串靠及并靠卸料形式

以及岸站加注安装工况,对低温软管进行整体水动力学分析。通过分析低温软管响应的最大值,如张力、曲率等,为低温软管的设计优化提供最大载荷条件,确定危险截面位置,并通过对低温软管的整体布置参数的敏感性分析,得到参数变化规律,为FLNG整体布置与安装方案提供参考。

1 海洋细长柔性结构整体分析技术

1.1 环境荷载

(1) 波浪力

对波浪的描述,有基于流体力学的规则波理论描述,有基于统计的随机波浪理论描述。随机波浪理论可以用于模拟真实的海况,由实际测得的当地海域波浪过程的统计参数,如有效波高、有效周期等,结合常用的PM谱、JONSWAP谱等,对波浪的特性进行短期描述。

对于特征长度与波长之比相对较小的细长海洋结构物,波浪的主要作用是粘滞效应和附加质量效应,结构物的波浪力多采用Morison公式^[18]进行计算。根据Morison方程计算这类结构的垂直作用力为

$$f_m = \frac{1}{2} \rho_w D C_D V_{RN} |V_{RN}| + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} C_m V_{wN} - \rho_w \frac{\pi D^2}{4} (C_m - 1) V_{PN} \quad (1)$$

式中, V_{RN} 为流体与结构的相对速度, V_{wN} 为水质点的加速度, V_{PN} 为结构加速度, D 为流作用有效直径, C_D 为拖曳力系数, C_m 为附加质量系数, ρ_w 为海水密度。

(2) 海流作用力

对于受多种因素影响的海流,ISSC建议海流速度可以描述为

$$U = U_t + U_w + U_s + U_m + U_{set-up} + U_d \quad (2)$$

式中, U_t 为潮汐流分量, U_w 为风致流分量, U_s 为Stokes漂移运动生成的流分量, U_m 为海洋环流分量, U_{set-up} 为上涌现象及飓风生成的流的分量, U_d 为海洋密度驱动流。

(3) 浮体运动

浮体运动在细长柔性结构分析中是作为环境荷载考虑的,这是因为浮体运动由风、浪、流等环境荷载导致,浮体运动可以划分为波频运动(一阶运动)、低频运动(二阶运动)、平均漂移。其中波频运动是浮体受到波浪荷载的作用而产生的与波浪频率一致的运动,波频运动主要由浮体的性质及其系泊决定,受到海洋立管等柔性连接结构物的影响较小。

1.2 水动力分析

多浮体及漂浮软管系统的水动力计算基于专业水动力分析软件Orcaflex^[19]完成,主要分析低温软管在安装工况、串靠卸料工况以及并靠卸料工况下的静态、动态水动力。

(1) 静力分析

静力分析是根据模型系统的特征以及外载荷进行分析,得到结构的静平衡位置。静力分析除了能够简单检验分析模型能否达到静平衡,同时还为动力分析提供一个最佳的初始位置。静力分析的目的是考察各参数选择方案在静力作用下的荷载与形态。除了考虑重力、浮力之外,还需要考虑船体位置偏移以及流荷载的作用。静力分析由于计算效率高,在低温管的初步设计阶段有着非常重要的作用。在工程分析校核上,静力分析一般是动力分析的初始阶段,不必专门进行。

(2) 动力分析

在动力分析阶段,需要分析细长柔性结构在海洋环境荷载下的动态响应,并校核其是否满足设计准则。动态分析流程如图3所示,在获得静态设计后,需要在数值分析软件中建立起整体结构的力学模型,并依据分析目标(如极值分析、疲劳分析等)、分析方法(规则波法、不规则波法)以及安全等级(如ULS、SLS、ALS、FLS)设计荷载工况矩阵,进行时域或频域下的动态响应分析。最后进行详细校

核, 含极值荷载校核、疲劳寿命估计、干涉分析和稳定性分析。

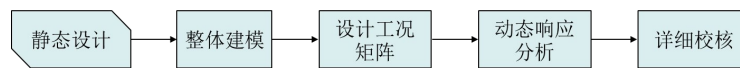


图3 动态分析流程

Fig.3 Dynamic analysis process

2 LNG 卸料系统整体分析

对 LNG 低温软管结构的船-船串靠卸料工况、船-船并靠卸料工况进行静态和动态分析, 计算其关键力学响应的变化过程, 如张力、曲率等, 并通过对不同整体布置方案的研究, 得到不同布置参数的变化对 LNG 低温软管水动力响应的影响规律。

2.1 结构参数及环境参数

进行并靠与串靠整体分析时, 考虑两艘船船型一致, 都采用 FLNG 船体参数, 如表 1 所示。

表 1 FLNG 船体的主要参数

Tab.1 Main scale parameters of FLNG

名称	符号/单位	数值	名称	符号/单位	数值
总长	L_{oa}/m	392.00	重心垂向位置	K_c/m	20.553
垂线间长	L_{pp}/m	356.00	重心纵向位置	L_{CG}/m	171.02
船宽	B/m	69.00	横摇惯性半径	K_{ϕ}/m	25.35
型深	D/m	35.70	纵摇惯性半径	K_{ψ}/m	91.36
吃水	T/m	13.85	首摇惯性半径	K_{ξ}/m	93.40
排水量	Δ/t	320 804	LNG 容量	V/m^3	290 000

进行整体分析时, LNG 低温软管的截面参数如表 2 所示。

分析工况设计为我国南海某水深 1500 m 目标气田, 验证工况选用的风浪流条件如表 3 所示。

表 2 LNG 低温软管截面参数

Tab.2 Cross-sectional parameters of LNG cryogenic flexible hoses

管径	外径/mm	345
	内径/mm	214
	拉伸刚度/kN	4600
刚度	弯曲刚度/(kN·m ²)	14.8
	扭转刚度/(kN·m ²)	394
	质量/(kg·m ⁻¹)	33.3
	设计温度/°C	-163
	名义工作压力/MPa	1.05
	许用张力/kN	114

表 3 验证工况的环境参数

Tab.3 Environmental parameters of validation working condition

环境条件		载荷参数
风	风速/(m·s ⁻¹)	13
	风向/°	180
浪	有义波高/m	2.5
	谱峰周期/s	10.0
	浪向角/°	180
	波浪谱	JONSWAP($\gamma = 3.0$)
流	流速/(m·s ⁻¹)	0.81
	流向/°	180

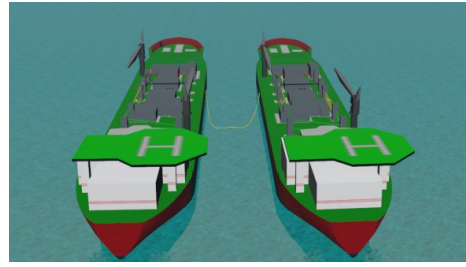
2.2 LNG 并靠卸料系统整体分析

2.2.1 并靠卸料系统整体水动力分析

利用 OrcaFlex 软件, 对照实物图, 按照原型比例, 建立船-管-船并靠卸料系统数值模型。如图 4 所示, 两只船的船型相同, 吃水深度为 13.85 m, 船距 h 为 40 m, LNG 低温软管模型的长度 l 为 85 m, 软管两端距离海平面的高度为 29.85 m。



(a) 实物图



(b) 数值模型

图4 并靠卸料系统

Fig.4 Side-by-side (SBS) unloading system

对LNG低温软管先进行静态分析,之后进行动态分析,可得到并靠工况下沿管长分布的各节点相对位置的变化情况,如图5所示。可以看出管道在空间位置上有较为明显的变化。

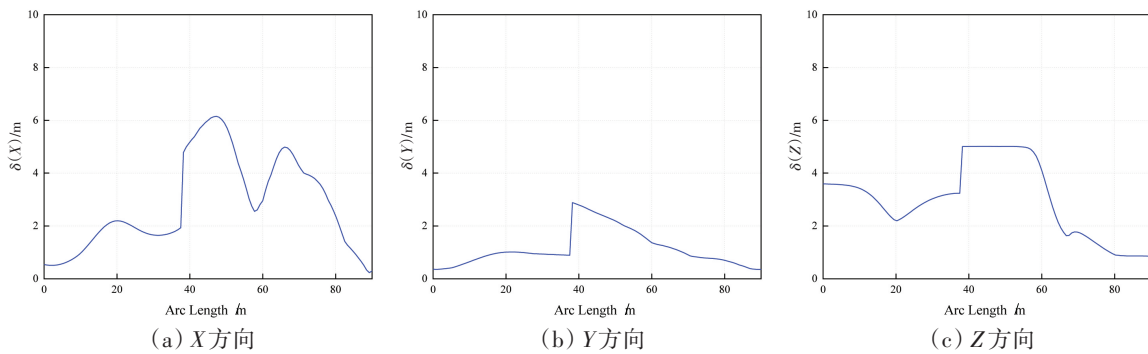


图5 沿管长分布的各节点相对位置变化曲线(并靠工况)

Fig.5 Relative position change curve of each node distributed along the hose length (SBS condition)

进一步提取管道的静态张力响应、曲率响应以及动态张力响应、曲率响应计算的结果如图6所示,响应极值如表4所示。从图6可以看出:低温软管的较大张力发生在管道与FLNG船连接的两端,软管的最小张力和曲率均出现在管道中部,管道的中部由于漂浮在海面上,因此该段张力值较低;低温软管的较大曲率发生在管道与海面接触部分的两端。

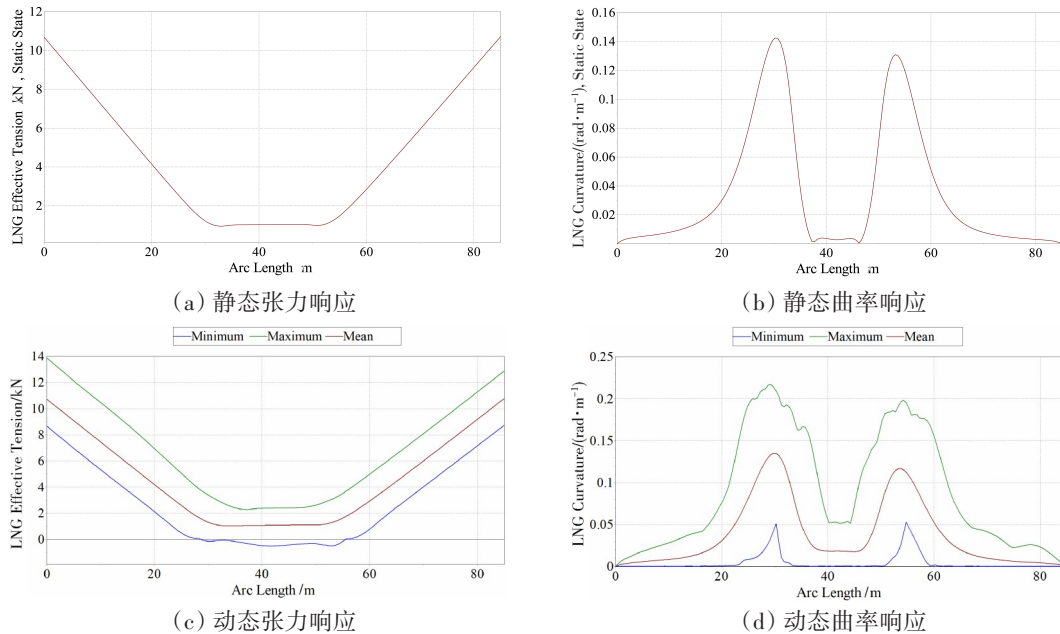


图6 并靠模型计算结果($h=40\text{ m}, l=85\text{ m}$)

Fig.6 Calculation results of SBS model ($h=40\text{ m}, l=85\text{ m}$)

表4 并靠算例计算结果

Tab.4 Calculation results of SBS case

响应极值	静态分析最大 张力/kN	静态分析最大 曲率/(rad·m ⁻¹)	动态分析最大 张力/kN	动态分析最大 曲率/(rad·m ⁻¹)
数值	10.72	0.14	13.87	0.22

2.2.2 并靠卸料系统参数敏感性分析

考虑并靠系统的两个布置参数,即两船间距 h 和软管长度 l ,如图7所示。 h 设置为(40 m, 50 m), l 设置为(75 m, 80 m, 85 m, 90 m, 95 m),对10组设计工况开展敏感性分析,结果见表5。

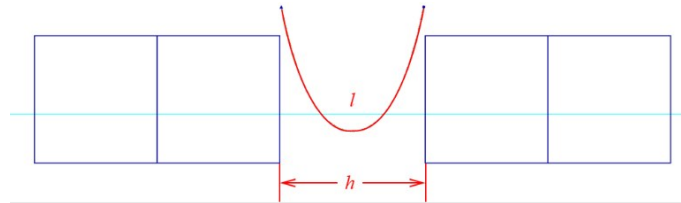


图7 并靠卸料系统敏感性分析参数示意图

Fig.7 Schematic diagram of sensitivity analysis parameters for SBS unloading system

表5 并靠卸料系统敏感性计算结果

Tab.5 Calculation results of SBS sensitivity analysis

编号	间距 h /m	管长 l /m	静态最大 张力/kN	静态最大 曲率/(rad·m ⁻¹)	动态最大 张力/kN	动态最大 曲率/(rad·m ⁻¹)
1	40	75	12.64	0.10	15.20	0.16
2	40	80	11.64	0.10	14.43	0.17
3	40	85	10.72	0.14	13.87	0.22
4	40	90	10.07	0.18	13.70	0.27
5	40	95	9.60	0.22	12.40	0.34
6	50	75	13.23	0.06	13.80	0.07
7	50	80	13.86	0.07	16.49	0.12
8	50	85	12.99	0.08	16.53	0.14
9	50	90	11.64	0.11	15.66	0.20
10	50	95	10.72	0.14	14.64	0.26

根据计算结果绘制并靠系统的敏感性分析曲线,见图8。可以看出,当 h 为40 m时,最大张力随 l 的增大而减少,而最大曲率随 l 的增大而增大,两者均接近线性变化的趋势,此时最优的管长设计取为

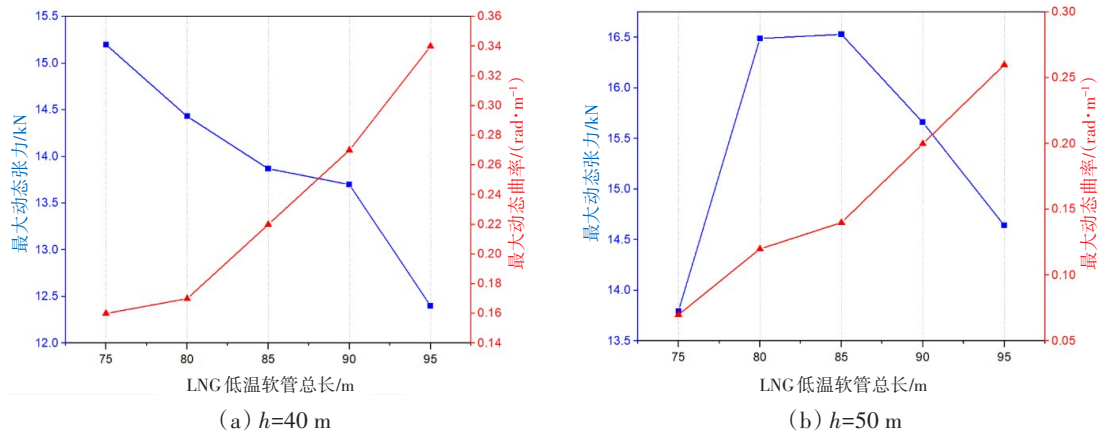


图8 并靠工况响应极值敏感性分析

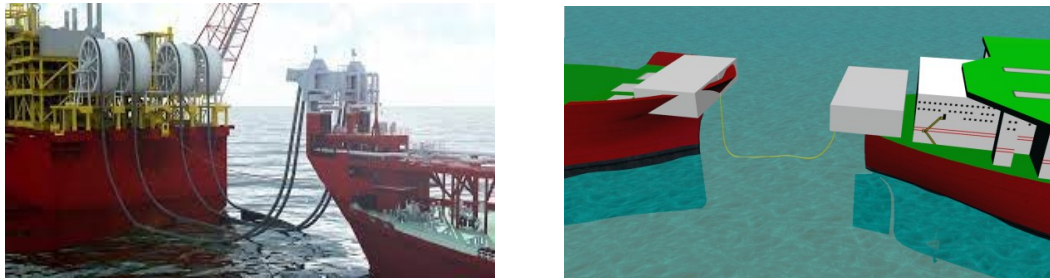
Fig.8 Sensitive analysis of the extreme response value of SBS condition

82.5 m; 当 h 为 50 m 时, 最大曲率仍随 l 的增大而增大, 而最大张力表现为先增大 ($l \leq 85$ m) 后减小 ($l > 85$ m) 的非线性变化趋势, 可以看出最优管长设计为 75 m。

2.3 LNG 串靠卸料系统整体分析

2.3.1 串靠卸料系统整体水动力分析

使用相同的结构参数及环境参数, 建立船-管-船串靠卸料系统模型, 如图 9 所示。两船间距 h 为 40 m, LNG 低温软管总长 l 为 90 m, 软管两端距离海平面的高度为 29.85 m。



(a) 实物图

(b) 数值模型

图9 串靠卸料系统

Fig.9 Tandem unloading system

在进行静态及动态分析后, 得到串靠工况下沿管长分布的各节点相对位置的变化情况, 如图 10 所示。可以看出该工况下的管道运动情况比并靠工况更为激烈。

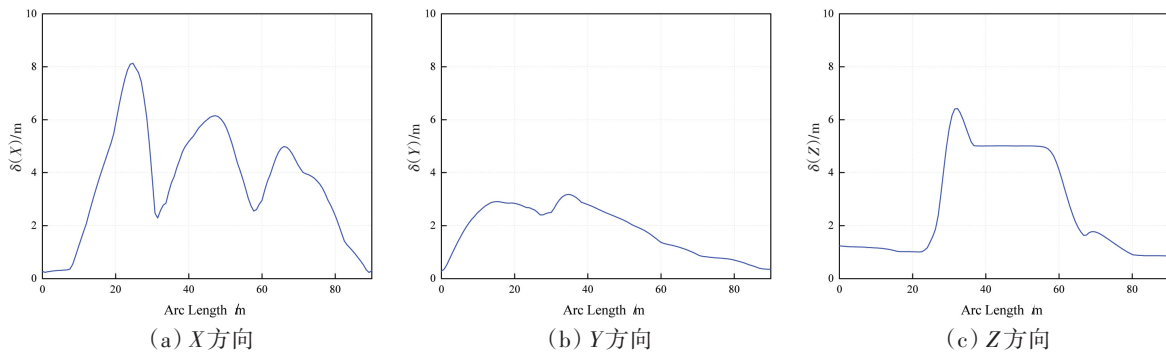
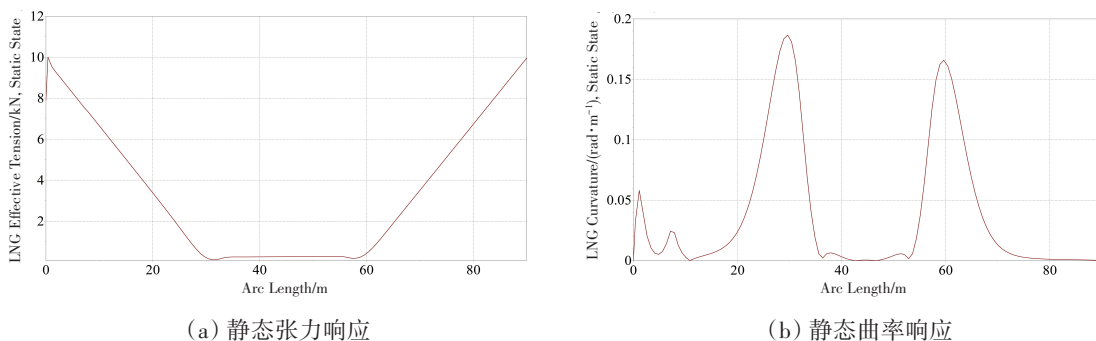


图10 沿管长分布的各节点相对位置变化曲线(串靠工况)

Fig.10 Relative position change curve of each node distributed along the hose length (tandem condition)

对低温软管进行水动力计算, 管道的静态张力响应和曲率响应以及动态张力响应和曲率响应结果如图 11 所示, 张力和曲率响应的最大值见表 6。从结果中可以看出, 低温软管的较大张力发生在管道与 FLNG 船连接的两端, 并且张力最小值与最大值之间差距较小, 但在软管漂浮部分, 会出现张力负值, 此时管道受到了轴向压缩, 但张力响应较小, 对结构的影响不大; 该算例的较大曲率处位于软管与海面接触部分的两端, 且左端高于右端, 这是由船体尾部与头部的运动响应差异引起的。



(a) 静态张力响应

(b) 静态曲率响应

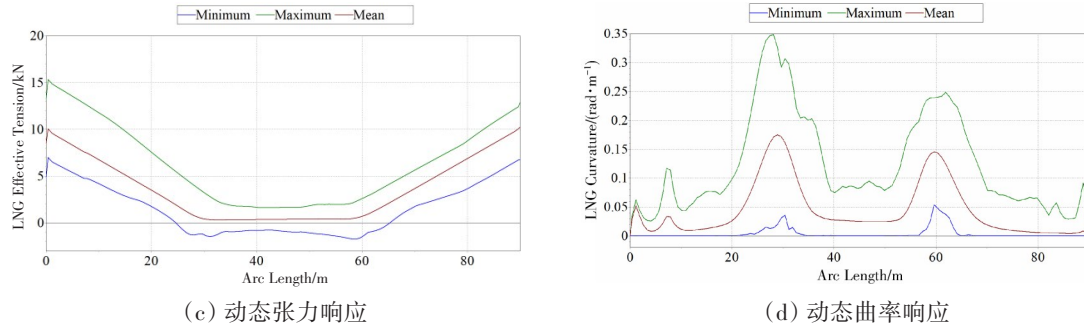


图11 串靠模型计算结果($h=40\text{ m}, l=90\text{ m}$)

Fig.11 Calculation results of tandem model ($h=40\text{ m}, l=90\text{ m}$)

表6 串靠算例计算结果

Tab.6 Calculation results of tandem case

响应	静态分析最大 张力/kN	静态分析最大 曲率/(rad·m ⁻¹)	动态分析最大 张力/kN	动态分析最大 曲率/(rad·m ⁻¹)
数值	10.00	0.19	15.34	0.35

2.3.2 串靠卸料系统参数敏感性分析

考虑串靠系统的两个布置参数,即两船间距 h 和软管长度 l ,如图12所示。 h 设置为(40 m, 50 m), l 设置为(75 m, 80 m, 85 m, 90 m, 95 m),对10组设计工况开展敏感性分析,结果见表7。

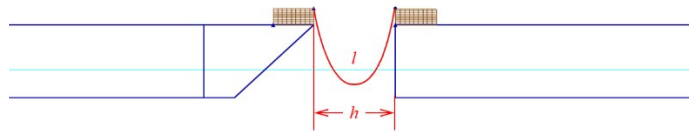


图12 串靠卸料系统敏感性分析参数示意图

Fig.12 Schematic diagram of sensitivity analysis parameters for tandem unloading system

表7 船-船串靠系统整体分析计算结果

Tab.7 Calculation results of tandem global hydrodynamic analysis

编号	间距 h/m	管长 l/m	静态最大 张力/kN	静态最大 曲率/(rad·m ⁻¹)	动态最大 张力/kN	动态最大 曲率/(rad·m ⁻¹)
1	40	75	12.64	0.10	15.43	0.16
2	40	80	11.65	0.11	15.30	0.21
3	40	85	10.75	0.14	15.19	0.30
4	40	90	10.00	0.19	15.34	0.35
5	40	95	9.48	0.23	16.15	0.38
6	50	75	14.20	0.06	18.75	0.07
7	50	80	14.80	0.07	20.08	0.12
8	50	85	13.73	0.08	19.66	0.15
9	50	90	12.20	0.11	18.63	0.24
10	50	95	11.22	0.14	17.28	0.28

串靠系统的敏感性分析曲线如图13所示。从上述结果可以看出:设置不同 h ,最大曲率的变化趋势均保持一致,始终随着管长 l 的增大而增大;然而,当 h 为40 m、管长 $l \leq 85\text{ m}$ 时,LNG低温软管的最大张力随 l 增加而减小,最优的管长设计为77.5 m;而当 $l > 85\text{ m}$ 时,最大张力随 l 增加而增大;当 h 为50 m,管长 $l \leq 80\text{ m}$ 时,最大张力随 l 增大而增大;当 $l > 80\text{ m}$ 时,最大张力随 l 增大而减少,存在明显的非线性变化趋势,此情况下的管长最优设计为75 m。

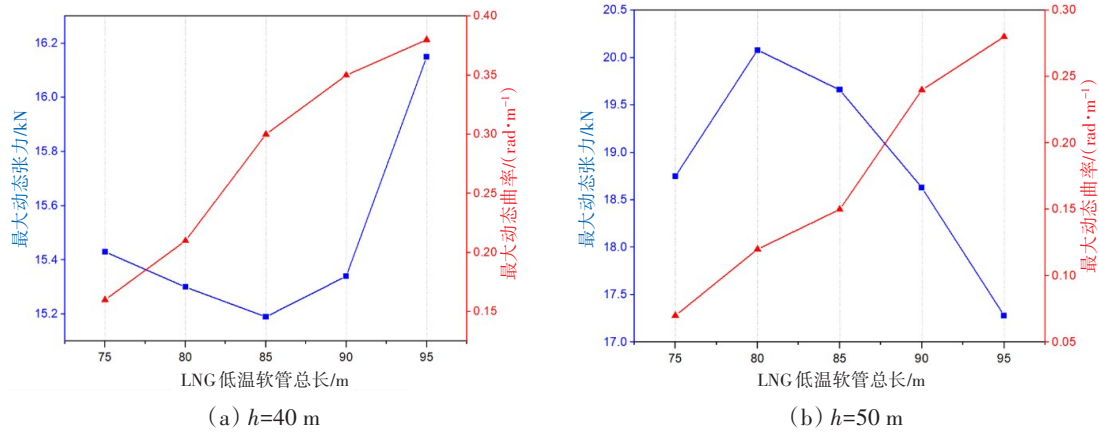


图 13 串靠工况响应极值敏感性分析

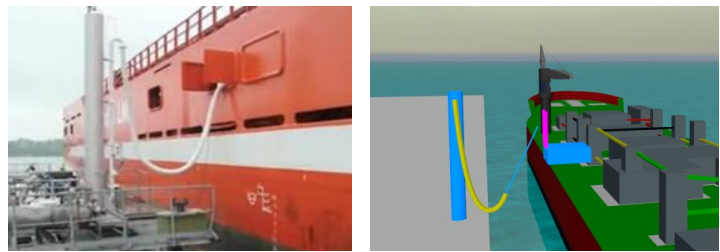
Fig.13 Sensitive analysis of the extreme response value of tandem condition

根据上述两种系统的分析结果可知,针对不同工况进行整体布置方案设计时,应该结合软管属性和实际情况,综合考虑船距和软管总长等不同设计参数的影响,从而选取最佳方案。

3 LNG 低温软管岸站加注安装工况整体分析

3.1 岸站加注安装工况整体水动力分析

根据表1与表2所示的浮体与LNG软管参数建立船岸加注安装工况模型,如图14所示。船岸间距 h 为6 m,LNG低温软管总长 l 为10 m,软管的左端点为靠岸固定端,距离海平面的高度为10 m,右端为移动端,在固定的提升速度下移动,初始高度为3.376 m,提升完成后的高度为8 m。海平面流速设置为0.3 m/s,有义波高为0.25 m,谱峰周期为4.0 s,波浪谱采用JONSWAP谱。



(a) 实物图 (b) 数值模型

图 14 船岸加注工况

Fig.14 Ship-to-shore refueling condition

将低温软管的安装提升速度设置为3 cm/s,开展静态与动态分析,并得到船岸加注工况下沿管长分布的各节点相对位置的变化情况,如图15所示。可以看出在X方向和Z方向上的运动更为激烈,Y方向上的运动较平缓。

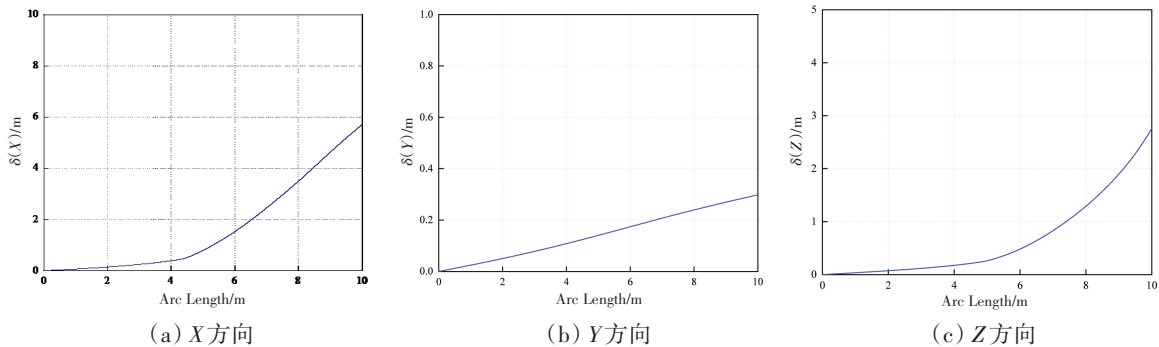


图 15 沿管长分布的各节点相对位置变化曲线(船岸加注工况)

Fig.15 Relative position change curve of each node distributed along the hose length (ship-to-shore refueling condition)

管道的静态张力响应、曲率响应以及动态张力响应、曲率响应结果如图16所示。可以看出,低温软管的较大张力出现在岸端连接点处,此处高度较高,受管道自重影响较大;在管道的中间部分,出现

的张力为负值,这是由于此时的管道受到轴向压缩,但张力数值较小,无明显影响。该算例中的较大曲率出现在管道的中段,这是由安装过程中低温软管的折弯导致。

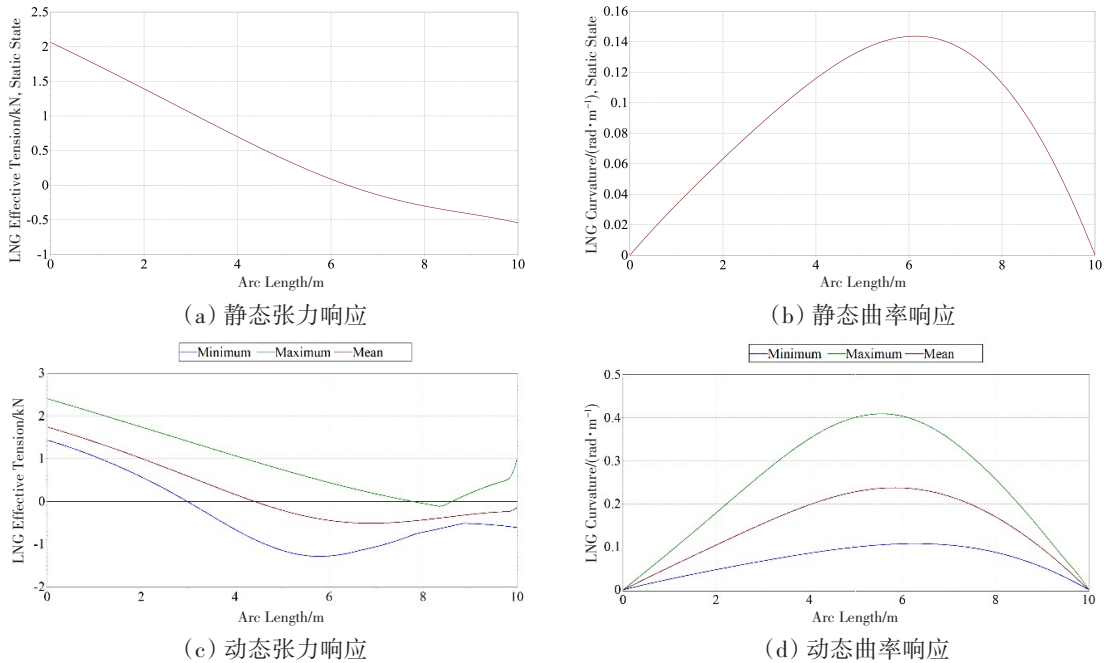


图 16 LNG 低温软管安装提升速度为 3 cm/s 的模型计算结果

Fig.16 Calculation results of LNG cryogenic flexible hose installation with a lifting speed of 3 cm/s

提取模型岸端连接点位置的张力响应时程并进行分析,张力时程信息如图 17 所示。可以看出:低温软管的最大张力出现在安装阶段初期,此时管道受到重力影响,又受到浮体运动影响,张力最大;随着安装的进行,软管的近船端逐渐向右和向上运动,自重的影响逐渐由近船端连接点分担,从而管道岸端连接点张力逐渐下降;在 100 s 后张力值的变化较小,张力值趋于稳定。

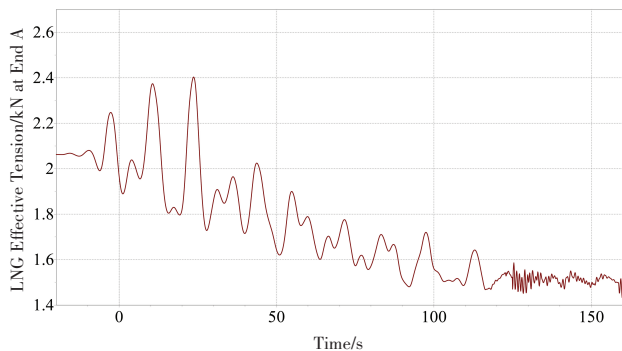


图 17 提升速度为 3 cm/s 时岸端连接点处张力时程

Fig.17 Dynamic tension response of the calculation model with a lifting speed of 3 cm/s

3.2 岸站加注安装工况参数敏感性分析

考虑岸站加注安装时,软管的安装提升速度 v 是重要的设计参数,见图 18。将 v 分别设置为(1 cm/s, 2 cm/s, 3 cm/s, 4 cm/s, 5 cm/s, 6 cm/s),对 6 组工况开展敏感性分析,得到最大张力与最大曲率的变化规律,详细计算数据见表 8,变化规律如图 19 所示。

表 8 岸站加注安装工况计算结果

Tab.8 Calculation results of install condition in shore-station filling system

提升速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	静态最大 张力/kN	静态最大 曲率/($\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$)	动态最大 张力/kN	动态最大 曲率/($\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$)
1	2.06	0.14	2.49	0.24
2	2.06	0.14	2.46	0.31
3	2.06	0.14	2.40	0.41
4	2.06	0.14	2.37	0.44
5	2.06	0.14	2.36	0.45
6	2.06	0.14	2.35	0.45

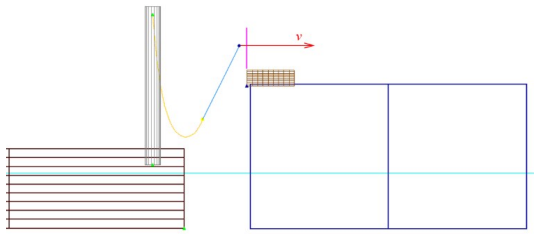


图 18 岸站加注安装敏感性分析参数示意图

Fig.18 Schematic diagram of sensitivity analysis parameters for ship-to-shore refueling condition

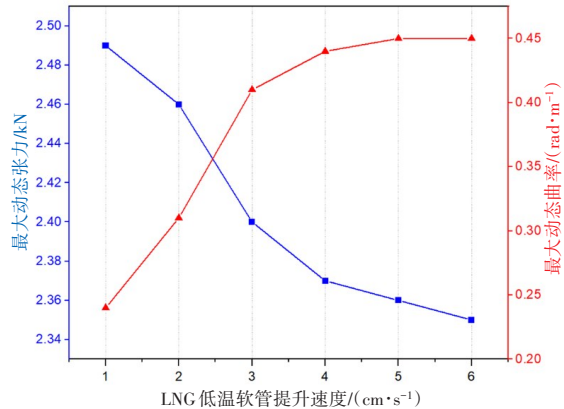


图 19 船岸加注工况响应极值敏感性分析

Fig.19 Sensitive analysis of the extreme response value of ship-to-shore refueling condition

从表 8 可以看出,对于不同的安装速度,静态情况下的结果没有改变,说明安装速度的改变对静态情况的影响可以忽略,进行整体分析时可以不考虑静态情况,以动态结果为主进行分析。从图 19 可以看出:随着安装速度的增大,动态张力随之减小;当安装速度在 1~4 cm/s 时,张力的减小趋势明显;而在 4~6 cm/s 时,减小趋势逐渐变缓;随着安装速度的增大,动态最大曲率也随之增大,但增速减慢;当安装速度在 1~3 cm/s 时,曲率变化趋势增大明显;在 3~6 cm/s 时,曲率变化趋势趋于平稳。因此,安装提升速度的改变对 LNG 低温软管的弯曲性能影响较大。

4 结 论

本文针对 LNG 低温软管的三种应用工况开展整体水动力计算分析,包括船-船并靠卸料工况、船-船串靠卸料工况和船岸加注工况,并进一步研究了低温软管整体布置参数对结构响应影响的敏感性。以直径 12 英寸规格的低温软管为研究对象,建立水动力计算模型,在波、浪、流等环境载荷的作用下,对低温复合软管进行静态及动态分析,研究其在不同工况下的关键响应极值,进一步开展关键布置参数(间距、管长、安装速度等)对管道结构的响应极值敏感性分析,计算分析结果表明:

(1) 在 LNG 并靠卸料工况时,增加低温软管的管长会导致管道的曲率极值增大,张力极值减小;增加连接点的间距则会使张力极值增大,曲率极值减小。

(2) 在 LNG 串靠卸料工况时,增加低温软管的管长会导致低温软管的曲率极值增大,使静态分析中的张力极值减小,动态分析中的张力极值增大;增加低温软管与船体连接点的间距同样会使张力极值增大,曲率极值减小。

(3) 在船岸加注工况时,提高安装提升速度并不会改变静态分析中的张力和曲率极值;当安装速度逐渐增加时,动态分析结果显示低温软管的张力极值逐渐减小,曲率极值逐渐增大。

参 考 文 献:

- [1] 孙国徽. 南海, 中国的领海[J]. 中国石油石化, 2014, 15: 82.
Sun Guohui. The South China Sea, China's territorial sea[J]. China Petrochem, 2014, 15: 82.
- [2] 谢 彬, 王世圣, 喻西崇. FLNG/FLPG 工程模式及其经济性评价[J]. 天然气工业, 2012, 32(10): 99-102.
Xie Bin, Wang Shisheng, Yu Xichong. FLNG/FLPG engineering pattern and the economic assessment[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 99-102.
- [3] 秦 琦. FLNG 主要技术发展[J]. 中国船检, 2014, 3: 69-70.

- Qin Qi. FLNG major technology developments[J]. *China Ship Survey*, 2014, 3: 67-70.
- [4] 赵文华. 浮式液化天然气装备(FLNG)水动力性能的数值分析及实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Zhao Wenhua. Numerical and experimental study on hydrodynamics of an FLNG system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [5] Ferreira A, Morooka C K. Evaluation of response of a floating cryogenic hose in offloading operation between FLNG unit and LNG carrier in tandem[C]//ASME International Conference on Ocean, 2015.
- [6] 徐岸南, 宋丽君, 钱强. 低温软管在海上LNG输送领域的应用研究[J]. *船舶与海洋工程*, 2015, 1: 41-44.
Xu Annan, Song Lijun, Qian Qiang. Research on the application of cryo-hose in the LNG transport at sea[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 1: 41-44.
- [7] 王文立. 深水和超深水油气勘探难点技术及发展趋势[J]. *中国石油勘探*, 2010, 15(4): 71-75.
Wang Wenli. Difficult technologies and development trends of oil and gas exploration in deep-water and ultra-deep-water areas[J]. *China Petroleum Exploration*, 2010, 15(4): 71-75.
- [8] Hellesmark S B, Andersen P G, Thorsen T B. Development and qualification of a tandem FLNG loading terminal for conventional LNG carrier[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference, Houston, 2015.
- [9] BS EN 1474-2: 2020. Installation and equipment for liquefied natural gas. Design and testing of marine transfer systems design and testing of transfer hoses[S]. 2020.
- [10] BS EN 13766: 2010. Thermoplastic multi-layer (non-vulcanized) hoses and hose assemblies for the transfer of liquid petroleum gas and liquefied natural gas-Specification[S]. 2010.
- [11] Witz J A, Ridolfi M V, Hall G A. Offshore LNG transfer-A new flexible cryogenic hose for dynamic service[C]//Offshore Technology Conference, 2004.
- [12] Jaiman R K, Oakley O H, Adkins J D. CFD modeling of corrugated flexible pipe[C]//ASME International Conference on Ocean. American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- [13] 杨志勋, 阎军, 卢青针, 等. 结构尺寸对LNG低温螺旋波纹管弯曲性能的影响分析[J]. *计算机辅助工程*, 2016, 6: 14-19.
Yang Zhixun, Yan Jun, Lu Qingzhen, et al. Analysis on effect of structural dimension on bending property of LNG cryogenic helical corrugated steel pipe[J]. *Computer Aided Engineering*, 2016, 6: 14-19.
- [14] 熊飞宇. FLNG低温柔性管道内衬层波纹管的扭转失稳分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
Xiong Feiyu. Torsional buckling analysis of lined bellows in FLNG cryogenic hoses[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [15] 王强. FPSO串靠外输时的多浮体系统响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
Wang Qiang. Analysis of multi-body responses in FPSO tandem offloading operation[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [16] 阳恒. FLNG码头系泊分析与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
Yang Heng. FLNG jetty mooring analysis and research[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [17] 郑晓云, 陈国明, 付建民, 等. 浮式LNG平台串靠卸载泄漏后果影响分析[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(1): 160-166.
Zheng Xiaoyun, Chen Guoming, Fu Jianming, et al. Leakage consequence analysis of the marine surface floating LNG platform with the tandem off-loading[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(1): 160-166.
- [18] Fergestad D. Handbook on design and operation of flexible pipes[M]. Trondheim: SINTEF, 2014: 101-115.
- [19] Orcina Ltd. Orcaflex manual version 9.1a[K]. Cumbria: Orcina Ltd, 2016.