

深水柔性立管整体性能分析

鲁成林¹, 李 兰¹, 宋平娜¹, 曹 静², 沙 勇², 周巍伟²

(1. 天津市海王星海上工程技术股份有限公司, 天津 300384; 2. 中海油研究总院, 北京 100028)

摘要 海洋软管在海洋油气资源开发中起到关键的作用。由于其耐腐蚀性强、地形适应性好、连续长度长、安装方便等优点, 逐渐取代了传统的海洋钢管。国际上已在深水油气田开发中大量使用柔性立管来连接浮式结构与海底生产系统, 但在国内还没有深水柔性立管的设计和生产技术。主要针对柔性立管在位工况下的整体性能如何分析来进行系统介绍。将立管参数、环境参数、与立管相连的浮式生产储卸油装置(FPSO)参数、立管造型等作为整体分析的输入条件, 利用分析软件, 进行静态分析、动态分析、规则波分析和不规则波分析。根据分析结果即可判断柔性立管是否符合应用要求。

关键词 海洋油气管道; 柔性立管; 复合软管; 浮式生产储卸油装置; 系泊分析; 整体分析

中图分类号 TE832 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2015)02-0088-05

Global Performance Analysis for Deepwater Flexible Riser

LU Cheng-lin¹, LI Lan¹, SONG Ping-na¹, CAO Jing², SHA Yong², ZHOU Wei-wei²

(1. Neptune Offshore Engineering Development Co., Ltd., Tianjin 300384, China;

2. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract Ocean flexible pipe is of great importance in ocean oil resource exploitation. Due to its outstanding capability of erosion resistance, terrain adaptability, long continuous length and convenient installation, flexible pipe is gradually replacing traditional steel pipe. Flexible riser has been widely used among foreign countries to connect the floating structures to underwater production system of deepwater oil/gas field. However, there is no design and manufacturing technology in China for deepwater flexible pipe. Here we focus on the introduction of analysis method on the global performance of flexible pipe in-place condition. Taking riser parameters, environmental conditions, parameters of the floating production, storage and offloading system, and the riser shape as input parameters, static analysis, dynamic analysis, regular wave analysis and irregular wave analysis can be performed using certain software. Based on the analysis results, one can easily judge whether the designed riser can meet the application requirements.

Key words marine oil and gas pipeline; flexible riser; composite flexible pipe; floating production, storage and offloading; mooring analysis; global analysis

0 引言

在海洋油气田开发中, 海底管线是海洋基础结构的关键组成部分。传统的海底管线主要是钢管。随着石油天然气工业的发展, 国际上海底输油复合软管技术也逐渐趋于成熟。与传统钢管相比, 复合软管有以下优点: 耐腐蚀性强; 地形适应性好; 连续长度长; 安装方便; 不需大型铺管船, 安装费用低。复合软管以其优越的特能在海洋油气田开发中的应

用越来越广泛。

目前深水复合柔性立管的设计技术主要由国外公司掌握, 国内尚处于起步阶段。为了提高海上油气开发能力, 我国把“深水海底管道和立管工程技术”纳入“十二五”规划中, 大力发展海洋资源开发的相关装备技术。“保温输油软管关键技术研究”是“深水海底管道和立管工程技术”的子课题之一, 研究目标为掌握保温输油软管设计、制造和试验的关键技术, 生产出可以在 300 m 水深作业

收稿日期: 2015-03-24

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05026-005)

作者简介: 鲁成林(1989—), 男, 助理工程师, 主要从事海洋工程和海洋软管方面的研究。

的保温输油软管样管及相关附件,并进行相关试验,以及设计 1 500 m 水深作业的保温输油软管及相关附件。

本文研究的柔性立管由聚合物非金属层和金属增强层通过物理的方式组合而成,层与层间不需要使用化学工艺黏合,各层是直接装配起来的,各层间通过摩擦和接触压力来传递荷载,能够承受较大荷载,同时柔韧性较钢管更好。柔性立管是海底生产系统与浮式装置之间的连接纽带,由于其运行期间一直悬浮在海水中,长期受到环境荷载的动态作用,所以需要对柔性立管进行动态的整体分析。本文主要介绍柔性立管的整体分析方法。

1 柔性立管的结构形式

柔性立管的结构如图 1 所示。主管各层结构的功能^[1-3]如表 1 所示。表 2 给出了软管整体的性能参数。

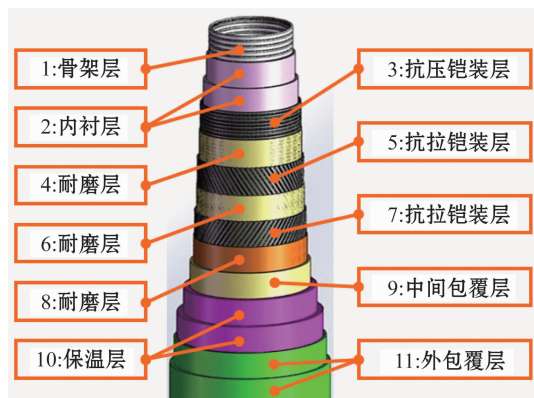


图 1 柔性立管结构

Fig. 1 Flexible riser structure

表 1 各层结构功能介绍

Table 1 Function of each layer in the structure

序号	名称	功能
1	骨架层	支撑内压密封层,防止内压密封层压溃
2	内压密封层(内衬层)	形成输送流体的密封层
3	抗压铠装层	承受内压及外压
4,6,8	耐磨层	固定金属层,防止金属与金属接触磨损
5,7	抗拉铠装层	承受轴向拉力
9	中间包覆层	限制抗拉层钢丝变形,减少磨损,双重保护
10	保温层	防止热量流失
11	外包覆层	抗机械损坏,防止海水进入

表 2 软管性能参数

Table 2 Properties of flexible risers

参数	取值
内径/mm	203.2
外径/mm	418.2
单重/(kg·m ⁻¹)	218
弯曲刚度/(kN·m ²)	472
轴向刚度/(MN)	660
扭转刚度/(kN·m ² ·rad ⁻¹)	7 390
存储弯曲半径/m	2.74
操作弯曲半径/m	4.0
允许操作最大曲率/m ⁻¹	0.25
允许最大拉力/kN	2 300
允许最大压缩/kN	100

2 柔性立管整体分析

2.1 整体分析方法

柔性立管整体分析过程如图 2 所示。整体分析中,立管在水中的造型、立管参数、环境参数和浮式结构[如浮式生产储卸油装置(FPSO)和钻井平台等]的运动形式等均作为立管整体分析的输入条件输入到分析软件(例如 OrcaFlex)中,最终得到立管的变形和受力情况,进而对复合软管进行截面分析,保证其满足规范要求。



图 2 柔性立管整体分析图解

Fig. 2 Schematic of the global analysis for flexible riser

2.2 输入条件

2.2.1 立管参数

分析中软管立管的输入条件参数包括内径、外径、管重、最小操作弯曲半径、弯曲刚度、轴向刚度和扭转刚度^[4]。

2.2.2 环境参数

分析中需要知道水深,风波流的相关数据,风波流的相对方向考虑共线和交叉两种工况^[5],如图 3 所示。

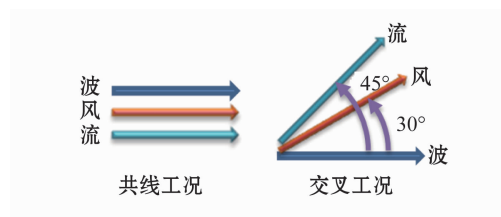


图3 风波流方向

Fig. 3 Directions of wind, wave, and current

2.2.3 FPSO 参数

首先需要对与立管相连的 FPSO 做系泊分析^[5], 从中得到 FPSO 在 5 个方向[Far, Near, Quartering far (Qfar), Quartering near (Qnear)和 Cross]的偏移量,同时确定立管的初始离船角度^[6]。偏移方向的描述见表 3。

表3 方向定义描述和图示

Table 3 Description and illustration for direction definition

偏移方向	图 示
<p>Near offset (Near)</p> <p>船的偏移作用方向与立管平面平行,朝向海床连接处。偏移作用与来流方向同向。船头与来流存在一个和工况相关的夹角 α</p>	
<p>Far offset (Far)</p> <p>船的偏移作用方向与立管平面平行,朝向远离海床链接处的方向。偏移作用与来流方向同向。船头与来流存在一个和工况相关的夹角 α</p>	
<p>Cross offset (Cross)</p> <p>船的偏移作用在与立管平面垂直的方向上。偏移作用与来流方向同向。船头与来流存在一个和工况相关的夹角 α。正负号用来区别两个等效的交叉偏移</p>	
<p>Quartering near offset (Qnear)</p> <p>船的偏移作用与立管平面成 45°角,朝向海床连接处。船头与来流存在一个和工况相关的夹角 α。正负号用来区别两个等效的偏移</p>	
<p>Quartering far offset (Qfar)</p> <p>船的偏移作用与立管平面成 45°角,朝向远离海床连接处方向。船头与来流存在一个和工况相关的夹角 α。正负号用来区别两个等效的偏移</p>	

2.2.4 其他参数

除 FPSO 的参数外,整体分析还需要用到的参数包括立管水力特性、管体内部流体性质和海生物属性等^[7]。

2.2.5 立管造型

在立管整体分析前,需进行立管的静态整体分析来得到立管在位状态的整体造型^[8],如图 4 所示。

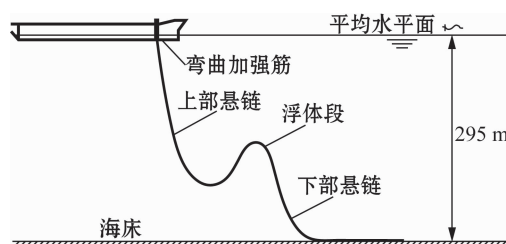


图4 柔性立管的 Lazy wave 形式

Fig. 4 Lazy wave configuration of flexible riser

2.3 柔性立管整体分析

2.3.1 柔性立管静态分析

柔性立管的静态分析,不考虑波浪和风的作用,考虑海流和FPSO的偏移。静态分析检验立管的静态拉力、刚度和曲率是否满足要求。同时静态分析可以确定立管的整体长度、立管上浮块的个数和分布形式、立管的初始离船角度及海底锚固位置等。

2.3.2 柔性立管动态分析

柔性立管动态分析很重要,是检验柔性立管是否满足使用要求的关键一步。动态分析要考虑所有荷载工况下的极端分析,一共分为50种工况来进行分析。

首先分为两部分,即系统完整工况下的分析和破坏工况下的分析^[9]。系统完整工况下,按波的谱峰周期 T_p 分为三种情况分析:TP、TP_{20%less}和TP_{20%more}。系统破坏工况下分为一条系泊缆损坏(One line damage)和转塔损坏(Turret damage)两种工况分析。以上5组情况下又按风波流的两种组合方向(共线和交叉)分别进行分析。这10种工况又按照FPSO的5个不同偏移方向分别进行分析,因此一共有50种工况。表4为 T_p 工况列表。

表4 TP工况列表

Table 4 Case list of TP working conditions

极端荷载工况	环境方向	偏移方向
EX-01-Re/Ir	共线	Far
EX-02-Re/Ir		Near
EX-03-Re/Ir		Cross
EX-04-Re/Ir		Qfar
EX-05-Re/Ir		Qnear
EX-06-Re/Ir	交叉	Far
EX-07-Re/Ir		Near
EX-08-Re/Ir		Cross
EX-09-Re/Ir		Qfar
EX-10-Re/Ir		Qnear

表4中只列出了TP条件下的工况,除此以外还有TP_{20%less}、TP_{20%more}、One line damage和Turret damage条件下的40种工况。

为了提高分析效率,节约分析计算时间,同时满足全面分析的要求,每个条件下分为规则波和不规则波两种分析。规则波分析得出立管所受拉力最大、拉力最小和曲率最大的最危险工况,然后分别对这些挑选出的最危险工况进行不规则波条件下的校核分析。

2.3.3 规则波分析

以TP条件为例,规则波分析结果如表5所示。

表5 TP条件下规则波分析结果

Table 5 Regular wave analysis results for TP conditions

极端荷载工况	环境方向	偏移方向	有效拉力/kN		最大曲率/ m^{-1}
			最大	最小	
EX-01-Re	共线	Far	1 002.3	-32.3	0.245
EX-02-Re		Near	741.7	-2.9	0.105
EX-03-Re		Cross	986.5	-31.5	0.223
EX-04-Re		Qfar	958.1	-28.2	0.226
EX-05-Re		Qnear	723.8	-3.1	0.121
EX-06-Re	交叉	Far	978.3	-37.0	0.222
EX-07-Re		Near	790.4	-22.5	0.132
EX-08-Re		Cross	748.9	-18.4	0.189
EX-09-Re		Qfar	774.1	-19.3	0.195
EX-10-Re		Qnear	789.0	-15.9	0.116

从表5可以看出最大有效拉力和最大曲率出现的工况是EX-01-Re共线Far,最小有效拉力(最大压缩)出现工况是EX-06-Re交叉Far,这两个工况需要进一步进行不规则波条件下的校核分析。

2.3.4 不规则波分析

根据规则波条件下的筛选分析结果,对筛选出的最危险工况进行不规则波条件下的分析。分析时

为了更合理,业内普遍采用选取随机种子算术平均值的方法来得到分析结果。每个工况选取5个种子的算术平均值作为不规则波条件下的分析结果。仍以TP条件下的工况为例,分析结果如表6所示。

从表6可以看出分析最大拉力为669.5 kN,最大曲率为 $0.167 m^{-1}$,均小于软管允许的最大拉力(2 300 kN)和最大曲率($0.25 m^{-1}$),所以此软管满足设计要求。

表6 最危险工况下的分析结果

Table 6 Analysis results for the most dangerous working conditions

极端荷载工况	环境方向	偏移方向	种子	有效拉力/kN		最大曲率/ m^{-1}
				最大	最小	
EX-01-Ir	共线	Far	S1	638.9	-2.1	0.165
			S2	703.5	1.4	0.176
			S3	651.9	6.1	0.157
			S4	707.2	4.1	0.183
			S5	646.5	8.7	0.155
			平均值	669.5	3.6	0.167
EX-06-Ir	交叉	Far	S1	636.1	-0.3	0.143
			S2	663.4	13.3	0.152
			S3	567.9	16.2	0.133
			S4	627.2	12.6	0.152
			S5	594.3	14.0	0.136
			平均值	617.8	11.9	0.143

3 结 语

整体分析是对海洋柔性立管整体性能强度的校核。当根据项目要求设计出一条新的柔性立管后,需分析此立管能否抵抗在项目目标海域条件下的环境荷载。此校核分析通过专业软管整体分析软件来进行,得到柔性立管在此环境荷载下受到的最大拉力和最大曲率值,与柔性立管本身的性能参数值进行比较,即可判断柔性立管的设计是否满足使用要求。

目前国内对深水柔性立管的研究已到了试制阶段,试制完成后将通过对样管进行各种原型试验验证设计结果,检验柔性立管各项性能是否达标。深水柔性立管研制成功,将使我国打破国外企业对深海柔性立管的垄断,提高海上油气资源开采能力,加速我国海洋石油的开发步伐。产品国产化也将大大降低海上油气开采成本,创造更多经济价值。

参 考 文 献

- [1] American Petroleum Institute. API SPEC 17J. Specification for unbonded flexible pipe[S]. 2008.
- [2] American Petroleum Institute. API RP 17B. Recommended practice for flexible pipe[S]. 2008.
- [3] International Organization for Standardization. ISO 13628-2. Petroleum and natural gas industries—design and operation of subsea production systems. Part 2: unbonded flexible pipe systems for subsea and marine application[S]. 2006.
- [4] Det Norske Veritas. DNV-OS-F201. Dynamic risers[S]. 2001.
- [5] Det Norske Veritas. DNV-OS-E301. Position mooring[S]. 2008.
- [6] Det Norske Veritas. DNV-RP-C205. Environmental conditions and environmental loads[S]. 2007.
- [7] Det Norske Veritas. DNV-OS-F101. Submarine pipeline systems [S]. 2012.
- [8] Det Norske Veritas. DNV-RP-C103. Column stabilized units [S]. 2005.
- [9] American Petroleum Institute. API RP 2SK. Recommended practice for design and analysis of station-keeping systems for floating structures[S]. 2005.