

# 波流作用下的张力腿平台顶张紧式立管干涉分析

石云<sup>1</sup>, 周晓东<sup>1</sup>, 曹静<sup>1</sup>, 刘小燕<sup>2</sup>

(1. 中海油研究总院, 北京 100028; 2. 北京高泰深海技术有限公司, 北京 100011)

**摘要** 顶张紧式立管(TTR)是张力腿平台(TLP)的关键部分之一。TTR之间干涉的风险随着水深的增加而增加,因而立管之间的干涉评估也就变得越来越重要。如果因干涉引起的碰撞力或参与碰撞的能量足够大,则有可能在立管的某区域产生损伤,降低立管的使用寿命,甚至危及平台的安全。针对某油田开发方案设计工作,对井槽间距的设置以及立管干涉分析进行研究,并对影响立管干涉性能的主要因素开展敏感性分析,为立管的研究及设计提供参考。

**关键词** 张力腿平台;顶张紧式立管;干涉;敏感性分析

**中图分类号** TP951 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2015)02-0084-04

## Interference Analysis of Top Tensioned Risers for Tension Leg Platform under Wave and Current

SHI Yun<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-dong<sup>1</sup>, CAO Jing<sup>1</sup>, LIU Xiao-yan<sup>2</sup>

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 2. COTEC, Beijing 100011, China)

**Abstract** Tension leg platform (TLP) has been widely used in deepwater oil field development in recent years. The risk of top tensioned riser (TTR) interference increases with the increase of water depth. If the collision force or collision energy caused by riser interference is large enough, it is possible to endanger the integrity of riser systems, and even the safety of the platform. TTR interference assessment becomes increasingly important and a design challenge for deepwater TLP. Reasonable well-bay spacing should be selected to avoid TTR collision and also minimize the impact on TLP topsides. Based on an oil field development plan, well-bay spacing and riser interference are investigated. The key parameters such as drag coefficient and top tension factor are discussed, and sensitivity analysis is carried out on those factors. The results may provide references for the research and design of TTRs.

**Key words** tension leg platform; top tensioned riser; interference; sensitivity analysis

## 0 引言

张力腿平台(TLP)在深水油气开采中得到了广泛的应用。顶张紧式立管(TTR)是TLP的关键部分,它连接水下井口与平台,十分重要。TTR通常是由一系列的钢管在顶部通过张紧设施与TLP连接,底部与固定于井口上的应力节点等连接的立管结构型式<sup>[1]</sup>。对于紧密排列的顶张紧式立管,相近立管动力行为的失谐导致不同立管具有不同的动力响应。在服役期间,其运动行为主要受到张力腿平台的运动、波和流的影响,使得相邻立管在某水深处可能发生干涉造成损伤,降低立管的使用寿命,甚至

会危及平台的安全<sup>[2]</sup>。

本文以某油田TLP为基础,对井槽间距的设置以及TTR的干涉分析进行研究,并对影响TTR干涉性能的主要因素开展敏感性分析,为今后TTR的研究和设计提供参考。

## 1 立管井槽间距确定的原则

在确定TTR井槽间距时,至少需要满足以下两点要求:

(1) 需要保证立管下放过程中(或者操作期间)具有足够的间隙来满足水下机器人(ROV)对操作空间的要求。

收稿日期:2015-03-20

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05030-006)

作者简介:石云(1984—),男,硕士,工程师,主要从事海底管道和立管的设计与研究。

(2) 相邻立管之间在极端条件环境下不发生碰撞,或者是偶尔碰撞但不会对立管造成损坏。

立管之间的间距越大,相邻立管发生碰撞的可能性越小,但是需要占用 TLP 平台组块更大的面积,同时钻机滑轨的间距也会相应加大,这些因素都会造成组块重量的增加,从而可能引起 TLP 投资的增加。所以设计原则是:在满足 ROV 操作空间要求和 TTR 不发生干涉的前提下,尽可能缩减井口间距。

## 2 立管干涉分析方法

### 2.1 立管间隙确定原则

立管的干涉分析通常有两种设计思路<sup>[3]</sup>。第一种是在极端工况下不允许立管发生碰撞,另外一种是在允许在极端工况或者偶然工况下立管之间发生碰撞,但是需要保证碰撞后立管的结构完整性不会受到损坏。对于大部分工程项目,都是选择立管在极端工况下不发生碰撞进行设计。本文也是基于立管不发生碰撞的条件来进行干涉分析的。

根据 DNV-RP-F203 规范<sup>[3]</sup>推荐,如未考虑相邻立管可能发生的涡激振动,要保证相邻立管不发生碰撞,需要满足相邻立管的净间隙  $\Delta \geq D_1 + D_2$ ,其中  $D_1, D_2$  分别为相邻立管的外径,如图 1 所示。

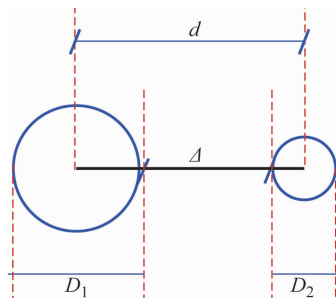


图 1 干涉最小间距准则

Fig. 1 Minimum spacing criterion

### 2.2 分析软件及模型

本文主要采用商用软件 OrcaFlex 进行 TTR 的干涉分析<sup>[4]</sup>,上游立管对下游立管的尾流效应在软件中采用 HUSE 模型<sup>[5]</sup>。根据 API RP 2RD<sup>[6]</sup>,上游立管产生的尾流会减小作用在下游立管上的流速,从而导致相邻立管之间的间隙缩小,甚至发生碰撞。所分析的 TTR 由外套筒和油管组成,分析采用等效模型将多层管的 TTR 简化为单层管结构进行建模。为了使等效管所受外力以及弯曲、拉伸特

性不发生变化,等效管的外径与套筒的外径相同,等效管的截面积是套筒和油管截面积之和,等效截面惯性矩是套筒和油管惯性矩之和,等效管的重量是外套筒和油管重量之和。

## 3 目标油田 TTR 干涉分析

### 3.1 环境条件

本文以某油田环境条件为设计基础。该油田范围平均水深为 404 m,百年台风条件下最大波高为 23.5 m,百年台风条件下表层流速为 2.49 m/s。由于目标油田海域内孤立波频繁发生,在立管设计过程中应该充分考虑。根据本项目环境专业提供的资料,内孤立波在工程应用上当成流来处理,并与一年一遇季风条件下的流进行叠加(内波在本文中只作为环境专业提供的基础数据,对于内波的机理不作详细探讨);一年季风条件下表层流速为 0.99 m/s,内波流表层流速为 1.55 m/s。

### 3.2 立管基础数据

该 TLP 平台设有 16 个井槽。考虑 ROV 的操作空间,井槽中心间距初步设置为 4.5 m。立管基础参数如表 1 所示,立管设计年限为 20 年。

表 1 立管基础设计参数

Table 1 Riser design parameters		
参数	外径/mm	壁厚/mm
生产立管	273.05	11.43
生产油管	114.30	7.70
钻井立管	394.00	19.00

### 3.3 立管干涉分析结果

为了保证立管之间不发生干涉,需要针对相邻立管在不同状态下开展相关分析,主要有以下 3 种情况:

- (1) 生产立管(正常生产状态)与邻近的生产立管(正常生产状态);
- (2) 生产立管(正常生产状态)与邻近的生产立管(完井或修井状态);
- (3) 生产立管(正常生产状态)与邻近的钻井立管。

针对以上 3 种情况,均需要考虑极端工况(百年台风)以及内波工况(一年季风+内波)进行校核。校核结果如表 2~4 所示。

表2 生产立管与钻井立管干涉分析结果

Table 2 Interference analysis results of production TTR to drilling TTR

上游立管	下游立管	环境条件	立管净间隙 $\Delta/m$
生产立管-正常操作	钻井立管	百年台风	0.962
生产立管-正常操作	钻井立管	一年季风+内波	1.411
钻井立管	生产立管-正常操作	百年台风	1.907
钻井立管	生产立管-正常操作	一年季风+内波	2.237

表3 生产立管与生产立管干涉分析结果

Table 3 Interference analysis results of production TTR to production TTR

上游立管	下游立管	环境条件	立管净间隙 $\Delta/m$
生产立管-正常操作	生产立管-正常操作	百年台风	1.678
生产立管-正常操作	生产立管-正常操作	一年季风+内波	1.953

表4 生产立管与生产立管(完井/修井工况)干涉分析结果

Table 4 Interference analysis results of production TTR to production TTR (completion/workover)

上游立管	下游立管	环境条件	立管净间隙 $\Delta/m$
生产立管-完井/修井工况	生产立管-正常操作	百年台风	2.423
生产立管-完井/修井工况	生产立管-正常操作	一年季风+内波	2.516
生产立管-正常操作	生产立管-完井/修井工况	百年台风	1.412
生产立管-正常操作	生产立管-完井/修井工况	一年季风+内波	1.922

从上述数据可以看出,生产立管与相邻钻井立管之间的间隙值最小。这是因为相比于生产立管之间,生产立管和钻井立管管径相差较大,在海流作用下,相邻生产立管和钻井立管变形的差异较大,立管之间的间隙较小;而相邻生产立管由于变形相对一致,间隙则较大。但分析结果显示,相邻立管之间的间隙均大于两立管直径之和,满足 DNV-RP-F203 规范要求,因而该油田 TLP 方案中立管之间不发生干涉。

## 4 相邻顶张紧式生产立管干涉敏感性分析

对立管干涉分析影响较大的两个因素是顶张力系数(TTF)和立管的拖曳力系数  $C_d$ <sup>[7]</sup>。TTF 通过调整张紧器来进行调节,主要影响立管的张力。立管的拖曳力系数因选择的涡激振动(VIV)抑制装置(Strake 还是 Fairing)不同而差异较大,从而对立管干涉分析影响较大。下面分别针对这两个因素开展敏感性分析。

### 4.1 顶张力系数敏感性分析

顶张力系数是作用在立管上的顶张力与立管张力环以下部分立管的湿量之比。在其他设计参数不

变的情况下,分别选取顶张力系数为 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 四组数据进行对比计算分析,得出不同顶张力系数时生产立管之间的最小间隙,结果如图 2 所示。

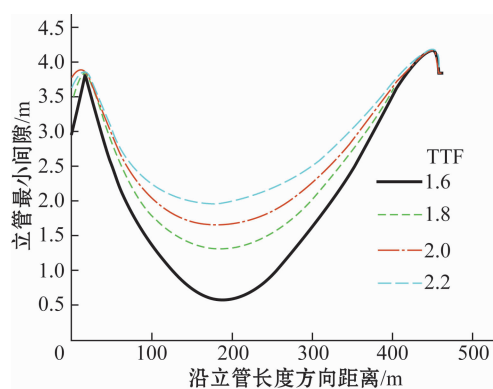


图2 顶张力系数敏感性分析

Fig. 2 Sensitivity analysis for TTF

从图2可以看出,立管顶张力系数增大,立管之间的最小间隙值也随之增大,这主要是因为作用在立管顶部的张力越大,立管被拉伸得越紧,在海流作用下发生的变形越小,立管之间的间隙也就越大。可见,增加顶张力能够有效增加立管之间的最小间隙,有效减轻立管之间的干涉现象。然而随着顶张力系数的增大,对张紧器能力的要求将相应地提

高,同时对平台施加的垂向载荷也更大。因此,对设计者而言,需要综合考虑对平台施加的载荷、立管干涉和张紧器选型来选取合适的顶张力系数。

#### 4.2 拖曳力系数敏感性分析

由于该油田区域流速较大,需要在高流速区域的立管部分增加 VIV 抑制装置来减小立管的 VIV 效应,从而保证立管的疲劳寿命能满足要求。目前业界应用的 VIV 抑制装置有 Strake 和 Fairing 两种,这两种装置都能有效地抑制 VIV 的发生,从而大大提高立管的疲劳寿命。但是这两种抑制装置的拖曳力系数差别较大;Strake 具有较大的拖曳力系数,通常大于 1.2;而 Fairing 的拖曳力系数通常较小,为 0.5~0.7。

为了研究采用 Strake 或者是 Fairing 立管干涉的影响,本文分别取立管拖曳力系数为 0.5、0.7、0.9、1.2 计算立管间隙最小值,计算结果如图 3 所示。

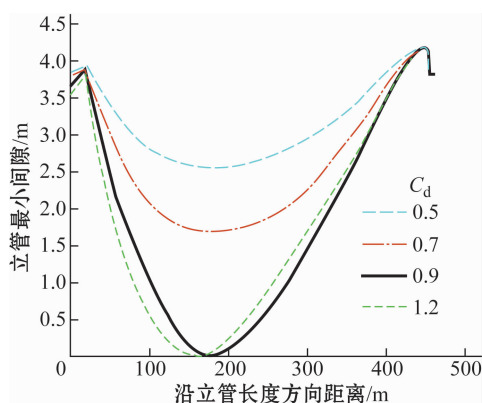


图3 百年台风条件(流最大)下拖曳力系数敏感性分析

Fig. 3 Sensitivity analysis for drag coefficient

从图3可以看出,立管最小间隙随着拖曳力系数的增大而减小。百年台风条件(流最大)下,拖曳力系数为0.5时,相邻生产立管之间间隙大于2.5m;拖曳力系数为0.7时,相邻生产立管之间间隙大于1.5m,仍可以满足规范要求;但当拖曳力系数增加到0.9甚至1.2时,相邻生产立管已经发生了碰撞。事实上,如果选用 Strake 作为 VIV 抑制装置,拖曳

力系数大于1.2,井槽间距需要从4.5m增加到6m以上,对平台的影响较大。所以,针对本项目,综合考量各方面的因素,立管采用 Fairing 作为 VIV 抑制装置。

## 5 结 语

本文以某油田为设计基础,对井槽间距的选择、顶张紧式立管的干涉分析及敏感性因素进行研究,得到了如下结论:

(1) 在综合考虑 ROV 操作空间及立管干涉分析的基础上,初步选定的4.5m井槽间距是合理的。

(2) 生产立管与钻井立管之间发生干涉的可能性最大,需要重点关注。

(3) 提高立管顶张力系数有利于降低立管之间发生干涉的风险。但顶张力系数的增加对张紧器、平台结构和立管结构都会造成影响,需要综合考虑予以确定。

(4) 拖曳力系数对立管之间的间隙影响很大;在选取 VIV 抑制装置时,需要综合考虑可能对立管干涉带来的影响。

综上所述,顶张紧式立管之间的干涉行为受多种因素的制约和控制,在设计中需要将多种因素综合考虑,合理确定各参数取值。

## 参 考 文 献

- [1] 中海石油研究中心. 深水立管选型报告[R]. 2011.
- [2] 马强,田荣涛. 深水立管之间的碰撞过程数值仿真[J]. 中国工程机械学报,2007,5(2):177.
- [3] Det Norske Veritas. DNV-RP-F203. Riser interference[S]. 2009.
- [4] Orcina Ltd. OrcaFlex manual version 9.5 a[M]. Daltongate: Orcina Ltd., 2012.
- [5] Huse E. Experimental investigation of deep sea riser interaction [C]. OTC, 1996; 8070.
- [6] American Petroleum Institute. API RP 2RD. Design of risers for floating production systems (FPSs) and tension-leg platforms (TLPs)[S]. 2006.
- [7] Koska R, Kaculi J, Campbell M, et al. Minimizing interference between top tension risers for tension leg platforms[C]. OMAE, 2013; 11182.