

# 基于疲劳寿命的海底管道自由悬跨分析

李秀锋, 冯现洪

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

**摘要** 传统悬跨分析以不发生涡激振动和强度极限状态为原则确定最大可以接受的自由悬跨长度。随着水深的增加,悬跨处理的成本急剧增加,以疲劳寿命为准则可以显著地增加最大可接受悬跨长度,减少工程费用。介绍了海底管道设计过程中的悬跨分析方法和悬跨接受标准。提出在设计阶段以疲劳极限状态为接受标准,并结合有限元计算进行悬跨分析,可减少悬跨处理量,节约大量工程费用。

**关键词** 海底管道;自由悬跨;涡激振动;疲劳极限状态;悬跨修正

**中图分类号** TE973.92 **文献标志码** A **文章编号**: 2095-7297(2015)03-0196-05

## Subsea Pipeline Span Analysis Based on Fatigue Life

LI Xiu-feng, FENG Xian-hong

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

**Abstract** Traditionally, span analysis determines the maximum allowable free span length based on the condition that no vortex induced vibration (VIV) will happen and the assumption of strength ultimate limit state (ULS). The cost of span mitigation rises rapidly with the increase of water depth. Free span analysis based on fatigue life could remarkably increase the maximum allowable span length and cut the engineering cost. We present the free span analysis method and criteria for subsea pipeline. Based on the engineering project which is the first time to use fatigue limit for pipeline design, the free span analysis is conducted by fatigue limit state (FLS) and finite element method, and the results minimize the number of span mitigation.

**Key words** subsea pipeline; free span; vortex induced vibration; fatigue limit state (FLS); span mitigation

## 0 引言

海底管道的自由悬跨一般由海床的不平整、海床变化(冲刷、沙波)、人工支撑等原因造成。自由悬跨段所受荷载主要由以下几个方面构成:由于自重和海床地形引起的静态弯矩,横流向涡激振动(VIV),顺流向涡激振动,波流组合产生的直接的拖曳和惯性荷载,以及拖网冲击荷载(如果存在)。在这些荷载的作用下,自由悬跨段可能由于顺流向或横流向的涡激振动引起疲劳破坏,也可能由于超过强度引起强度破坏。一般情况下,设计时就需要知道在不同工况下允许的最大悬跨,用以指导悬跨处理。

目前国际海洋工程界已经普遍接受了基于疲劳寿命的悬跨分析<sup>[1]</sup>,国内学术界也已经开始基于疲劳寿命的悬跨研究。王伟等<sup>[2]</sup>介绍了基于挪威船

级社(DNV)规范的典型多跨海底管道疲劳寿命,李小超等<sup>[3]</sup>基于流体力学计算远离边界的管道涡激振动响应。海底管道悬跨是靠近海床的,不能忽略边界的影响,悬跨分析也应采用系统完善的方法来指导工程实践。

海底管道设计目前使用的规范主要有 DNV-OS-F101<sup>[4]</sup>、美国机械工程师协会(ASME)的 ASME B31.8(或 31.4)<sup>[5]</sup>和美国石油协会(API)的 API RP 1111<sup>[6]</sup>。而这些规范关于自由悬跨的要求都指向同一个规范:DNV-RP-F105<sup>[7]</sup>。

以往国内工程界沿用浅水开发的习惯,以不发生涡激振动为接受标准。随着我国深水油气开发的发展,这一做法的代价变得非常高昂。本文介绍了海底管道设计过程中根据 DNV-RP-F105 规范进行的悬跨分析方法和悬跨接受标准,并结合工程实例,介绍了以疲劳极限状态为接受标准,结合有限元计

收稿日期:2015-06-03

作者简介:李秀锋(1980—),男,工程师,主要从事海底管道的结构设计。

算进行悬跨分析的方法。

## 1 自由悬跨分析方法

临时或永久状态下海底管道自由悬跨的评估应该针对疲劳(疲劳极限状态)和局部屈曲(强度极限状态)。由漩涡泄放和直接波浪荷载引起的振动在疲劳寿命以及强度准则都满足的条件下是可以接受的。这是 DNV-RP-F105 规范有别与以往规范的区别之一。该规范规定必须进行疲劳校核和极限强度校核,疲劳校核又分为疲劳筛选准则和疲劳准则。

### 1.1 疲劳筛选准则

疲劳筛选准则适用于涡激振动和波流联合作用引起的疲劳荷载。该筛选准则通过了详细的疲劳分析校验,能够满足超过 50 年的疲劳寿命。使用筛选准则需要满足的条件是悬跨段以第一阶对称半波模态为控制模态。

顺流向筛选准则如下:

$$\frac{f_{0,IL}}{\gamma_i} > \frac{U_{c,100year}}{v_{R,onset}^{IL} \cdot D} \cdot \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \frac{\gamma_{IL}}{\alpha}, \quad (1)$$

式中:  $\gamma_i$  为自振频率安全系数;  $\gamma_{IL}$  为顺流向筛选安全系数;  $\alpha$  为  $\frac{U_{c,100year}}{U_{w,1year} + U_{c,100year}}$ , 且不小于 0.6, 其中  $U_{w,1year}$  为 1 年重现期的波浪引起悬跨处的水质点速度;  $L$  为自由悬跨长度;  $D$  为管道外径(含涂层);  $U_{c,100year}$  为 100 年重现期的悬跨处水流速度;  $v_{R,onset}^{IL}$  为顺流向漩涡启动时的换算速度。

横流向筛选准则如下:

$$\frac{f_{0,CF}}{\gamma_i} > \frac{U_{c,1year} + U_{w,1year}}{v_{R,onset}^{CF} \cdot D} \cdot \gamma_{CF}, \quad (2)$$

式中:  $\gamma_{CF}$  为横流向筛选安全系数;  $U_{c,1year}$  为 1 年重现期的悬跨处水流速度;  $v_{R,onset}^{CF}$  为横流向漩涡启动时的换算速度。

### 1.2 疲劳准则

疲劳准则的要求如下:

$$\eta \cdot T_{life} \geq T_{exposure}, \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为许用的疲劳损伤比;  $T_{life}$  为疲劳设计寿命;  $T_{exposure}$  为使用时间。

疲劳损伤评估基于 Palmgren-Miner 的累积疲劳损伤原则:

$$D_{fat} = \sum \frac{n_i}{N_i}, \quad (4)$$

式中:  $D_{fat}$  为累积疲劳损伤;  $n_i$  为基于管壁中部应力范围  $S_i$  的总循环次数;  $N_i$  为在应力范围  $S_i$  失效的

应力循环次数。管道的应力范围和疲劳失效循环次数之间的关系,也就是 S-N 曲线,可以参考 DNV-RP-C203<sup>[8]</sup>。

在应力范围  $S$  下的失效循环次数  $N$  根据 S-N 曲线定义如下:

$$N = \overline{a_1} \cdot S^{-m_1} (S > S_{sw}), \quad (5)$$

$$N = \overline{a_2} \cdot S^{-m_2} (S \leq S_{sw}), \quad (6)$$

式中:  $m_1, m_2$  为疲劳指数 (S-N 曲线的反斜率);  $\overline{a_1}, \overline{a_2}$  为平均值减两个标准差曲线定义的特征疲劳强度常数;  $S_{sw}$  为双斜率 S-N 曲线转折点处的应力值。

疲劳设计寿命  $T_{life}$  定义如下:

$$T_{life} = \frac{1}{\sum \left( \frac{f_v \cdot S_i^m \cdot P_i}{a} \right)}, \quad (7)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  个应力循环的发生概率;  $f_v$  为振动频率。

在顺流向和横流向总的疲劳寿命应该按照下式在所有海况下积分。

$$T_{life}^{IL} = \left( \sum_{\theta} \sum_{H_s} \sum_{T_p} \frac{P_{H_s, T_p, \theta}}{\min(T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, IL}; T_{H_s, T_p, \theta}^{FM, IL})} \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$T_{life}^{CF} = \left( \sum_{\theta} \sum_{H_s} \sum_{T_p} \frac{P_{H_s, T_p, \theta}}{T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, CF}} \right)^{-1}, \quad (9)$$

式中:  $P_{H_s, T_p, \theta}$  为每种海况的发生概率;  $T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, IL}$  为顺流向涡激振动和横流向涡激振动导致的顺流向振动的共同作用下临界疲劳能力;  $T_{H_s, T_p, \theta}^{FM, IL}$  为顺流向涡激振动和横流向涡激振动导致的顺流向振动的共同作用下临界疲劳能力;  $T_{H_s, T_p, \theta}^{RM, CF}$  为横流向涡激振动在单一海况 ( $H_s, T_p, \theta$ ) 和满足长期概率分布函数的流的共同作用下临界疲劳能力;  $T_{H_s, T_p, \theta}^{FM, IL}$  为单一海况 ( $H_s, T_p, \theta$ ) 直接波浪与平均流速作用下的临界疲劳寿命。

### 1.3 极限强度准则

悬跨的极限强度校核要根据 DNV-OS-F101 荷载控制的局部屈曲准则进行。管道受的荷载主要为有效轴向力、内外压、自重引起的弯矩、水动力导致的弯矩以及横流向和顺流向涡激振动引起的弯矩。

波浪和流引起的水动力荷载和涡激振动引起的弯矩可以根据 DNV-RP-F105 规范推荐的方法计算。

### 1.4 疲劳校核方法的选择

传统的自由悬跨校核是控制悬跨长度避免涡激振动发生,疲劳筛选准则正是这一理念的延续,将涡激振

动幅值控制在可以忽略的范围内,比较保守地给出允许的悬跨长度,计算分析的工作量比较小,对基础环境数据的需求量也比较小。目前国内浅水海底管道设计基本都在使用疲劳筛选准则。

疲劳准则可以根据具体的疲劳寿命计算出允许的最大悬跨长度。根据疲劳校核准则计算出的许用悬跨长度要远大于疲劳筛选准则的计算结果。

在深水油气开发中,海底地形比浅水开发要复杂得多,由于地形而产生的自由悬跨非常普遍。在复杂海底地形条件下,悬跨处理需要的工程费用可能对海管路由选择产生决定性影响,严重时甚至会影响整个项目的工程经济评价。当前发展的趋势是使用疲劳准则用于悬跨分析。

### 1.5 响应模型

疲劳校核准则需要知道不同海况下的涡激振动幅值响应,结合波流作用下的力学响应分析,来计算疲劳寿命。力学响应无论是频域的模拟和简化的计算方法都是基于莫里森方程的水动力分析。

涡激振动幅值响应的经验模型可以参考 DNV RP F105 第4章,假定最大的稳态幅值响应是基础的水动力和结构参数的函数。在响应模型中,顺流向和横流向分别考虑。幅值响应取决于一系列基础的水动力和结构参数,这些参数构成了环境数据和响应模型的联系:

(1) 换算速度  $v_R = \frac{U_c + U_w}{f_n D}$ ,  $U_c$  为悬跨处水流速度,  $U_w$  为悬跨处波浪引起的水质点速度,  $f_n$  为结构的自振频率,  $D$  为管道外径(含涂层)。

(2) Keulegan-Carpenter 数,  $KC = \frac{U_w}{f_n D}$ 。

(3) 流速占比  $\alpha$ 。

(4) 相对管道的入射角  $\theta_{rel}$ 。

(5) 稳定系数  $K_s = \frac{4\pi m_e \zeta_T}{\rho_w D^2}$ , 其中  $m_e$  为单位长度的有效质量,  $\zeta_T$  为总的阻尼比,  $\rho_w$  为周围水的密度。

计算换算速度的时候需要知道悬跨的特征频率,该规范给出了一阶特征频率的简化算法,但需要满足以下条件:悬跨长度小于 140 倍钢管外径;静态垂向挠度小于 2.5 倍最大外径(含涂层);有效轴向力小于 0.5 倍临界屈服力,避免杆状屈曲;单一悬跨,没有临近悬跨的影响。

在南海深水海管项目中,由于特殊的海底地形和地质特点,不满足上述条件的悬跨比较常见,这时就不能再使用简化方法计算自振频率和模态,需要

使用有限元方法计算自振频率与模态,并进行多模态悬跨的疲劳寿命分析。

## 2 工程分析实例

### 2.1 项目概况

在南海番禺 35-1/2 气田开发项目中,有一条输气管线路由经过硬质海床区,海底地形复杂。根据海床不平整度分析预测,将有大量悬跨出现。海底管道的基本参数如表 1 所示。

表 1 海底管道的基本参数  
Table 1 Basic data of subsea pipeline

属 性	数 值
外径/mm	168.3
壁厚/mm	15.7
外防腐层厚度/mm	2.8
外防腐层密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	930
管道长度/m	9379
设计压力/MPa	27.0
介质密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	5.3
水深/m	357
剩余张力/kN	150

根据计算,在满足 1.5 节所列简化条件时计算出安装期(铺设后试压前)最大许用悬跨为 23 m,许用悬跨的极限条件为 140 倍钢管外径。而根据图 1 所示海底不平整度分析的结果,整条海管在安装后有 110 处超出 23 m 的悬跨。

如果要处理这些悬跨,在安装前就需采取抛石、人工支撑或切削海床措施。海底管道的安装误差可以控制到 ±5 m,也就是说,处理的带宽必须是 10 m。而本项目水深在 350 m 左右,完成这些水下处理需要数千万的工程费用。然而如果根据安装后调查的结果进行后处理,不仅可以减少处理带宽,也可能因为沉降等原因减少悬跨处理量。这就需要考虑如何减少安装前的预处理。

海底管道的安装期一般只有几个月时间,接着进行充水、试压、排水干燥、投产等流程,在安装期经受的疲劳损伤非常有限,所以非常有必要突破规范规定的简化算法的限制条件,而采用有限元法进行自振频率和模态分析,再通过规范进行多模态响应分析。需要说明的是,本项目是国内首次在设计阶段使用疲劳准则进行悬跨分析。

## 2.2 单一悬跨的疲劳寿命校核

经过筛选,选出最大的单一悬跨为 94 m。使用

ANSYS 有限元分析软件进行模拟,边界条件定义为一端固定约束一端铰支,前 5 阶模态的计算如表 2 所示。

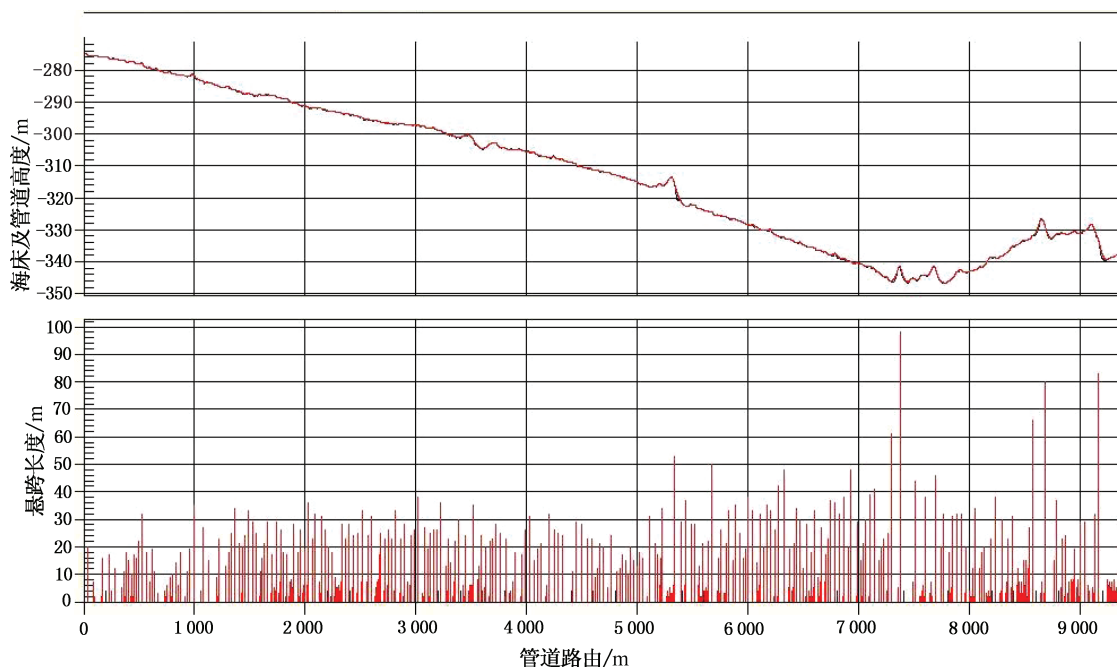


图1 海底地形剖面及悬跨长度分布

Fig.1 Seabed profile and free span length and location

表2 单一悬跨的模态计算结果

Table 2 Mode Analysis Results of Single Span					
模态阶数	1	2	3	4	5
自振频率/Hz	0.228	0.476	0.762	1.098	1.493
单位管径位移下的应力/MPa	24.572	47.365	95.374	128.90	208.26

将有限元计算出的模态信息输入到疲劳寿命计算程序 FATFREE(DNV 开发的商业软件),得出单一悬跨的疲劳寿命为 38.3 年,而安装期的时间小于半年,这样安装期的悬跨疲劳损伤约为 0.013。

对 5 阶以上的模态也进行了疲劳寿命校核,计算出的疲劳损伤太小,可以忽略不计。

极限强度校核的结果为:顺流向最大校核系数 0.06,横流向最大 0.85,均小于 1。因此,最大的单一悬跨在安装阶段是安全的,不需要悬跨预处理。

## 2.3 连续悬跨的疲劳寿命校核

经过筛选,选出最大的连续悬跨为 100 m,相邻的悬跨为 60 m,间隔的跨肩为 20 m,根据规范判断为相互干扰的连续悬跨,计算频率时应考虑相邻悬跨的影响。图 2 为连续悬跨的示意图,图中  $L_{sh}$  为跨

肩长,  $L_{span}$  为悬跨长。

使用 ANSYS 有限元分析软件进行模态模拟,模型包括这两个悬跨和跨肩。海床的接触以线性弹簧代替,间距为 1 m。边界条件定义为一端固定约束,另一端除轴向自由度外全部固定,轴向施加恒定剩余张力。前 5 阶模态的计算结果表 3 所示。

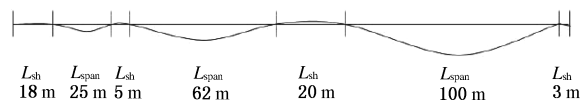


图2 最大连续悬跨

Fig.2 Maximum interacting spans

表3 连续悬跨的模态计算结果

Table 3 Mode analysis results of interacting spans					
模态阶数	1	2	3	4	5
自振频率/Hz	0.091	0.182	0.216	0.277	0.369
单位管径位移下的应力/MPa	7.638	15.52	14.04	23.88	23.83

将有限元计算出的模态信息输入到疲劳寿命计算程序 FATFREE,得出最大连续悬跨的疲劳寿命为 26.5 年,而安装期的时间小于半年,这样安装期

的悬跨疲劳损伤约为 0.019。

对 5 阶以上的模态也进行了疲劳寿命校核,计算出的疲劳损伤太小,可以忽略不计。

极限强度校核的结果为:顺流向最大校核系数 0.06,横流向最大 0.85,均小于 1。因此,最大的连续悬跨在安装阶段是安全的,不需要悬跨预处理。

通过分析可以证明最极端的单一悬跨和连续悬跨都不需要预处理,可以等到安装后再根据调查结果和操作期疲劳寿命分析结果进行后处理。

### 3 结 语

本文介绍了海底管道以疲劳寿命为接受准则的悬跨分析方法,并结合工程实例,在不满足简单模态悬跨的情况下,使用有限元法方计算单一悬跨和连续悬跨的自振频率和模态,进行疲劳寿命和极限强度分析,将本项目中悬跨接受长度从 23 m 提高到 100 m,从而避免了悬跨预处理,节省了大量工程费用。这种分析方法对于类似工程有一定的借鉴价值。

### 参 考 文 献

- [1] Macara J C. Malampaya deepwater gas pipeline and flowlines: technical and engineering challenges faced in the execution of the Malampaya pipeline scope [C]. OTC, 2002:14040.
- [2] 王玮, Kosor R, 白勇. 多跨海底管道的疲劳分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(5):560.
- [3] 李小超, 王永学. 稳定流作用下海底悬跨管线涡激振动研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(7):798.
- [4] Det Norske Veritas. DNV-OS-F101. Submarine pipeline system [S]. 2005.
- [5] American Society of Mechanical Engineers. ASME B31. 8-2012. Gas transmission and distribution piping systems [S]. 2012.
- [6] American Petroleum Institute. API RP 1111. Design, construction, operation, and maintenance of offshore hydrocarbon pipelines (limit state design)[S]. 2012.
- [7] Det Norske Veritas. DNV-RP-F105. Free spanning pipelines [S]. 2006.
- [8] Det Norske Veritas. DNV-RP-F203. Fatigue design of offshore steel structures[S]. 2006.

\*\*\*\*\*

### • 书 讯 •

## 船舶动力装置

徐筱欣 主编

上海交通大学出版社出版

定价:¥29.00

#### 内容简介:

本书着重阐述船舶动力装置的基本组成与工作原理、基本理论和基本性能。全书共分 7 章。第 1 章为总论;第 2、3 章介绍动力装置的组成与结构原理;第 4、5 章分析动力系统的配合特性、经济性问题;第 6 章研究动力装置的振动和噪声性能;第 7 章介绍动力装置设计的综合评估方法。

本书是船舶工程和热能动力机械专业动力装置及自动化方向的专业教材,也可作为相近专业的大学、专科学生的专业或参考教材,并可供船舶工程专业的设计、研究人员参考。

#### 目 录

第 1 章 总论

第 2 章 船舶推进系统

第 3 章 船舶辅助装置与管路系统

第 4 章 推进系统的动力配合性能

第 5 章 动力装置经济性与发动机的选型

第 6 章 动力装置的振动、噪声控制

第 7 章 动力装置设计的综合评判

