

水下穿越管道悬空段三级安全评价

杨涛, 郭旭, 成志强, 帅祝名, 胡聪

Three-Level Safety Evaluation of Suspended Sections of Underwater Buried Pipelines

YANG Tao, GUO Xu, CHENG Zhiqiang, SHUAI Zhuming, and HU Cong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.21656/1000-0887.430294>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋立管涡激损伤分析的虚拟激励法概述

A Summary of the Pseudo-Excitation Method for VIV Fatigue Damage Analysis of Marine Risers

应用数学和力学. 2017, 38(1): 60-66 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.370506>

海洋立管双模态动力学分岔分析

Bifurcation Analysis of Dual-Mode Dynamics for Marine Risers

应用数学和力学. 2020, 41(5): 480-490 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400257>

超临界输流管道3:1内共振下参激振动响应

Parametric Vibration Responses of Supercritical Fluid-Conveying Pipes in 3:1 Internal Resonance

应用数学和力学. 2018, 39(11): 1227-1235 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.390121>

跨海特大型桥梁风-浪耦合作用的随机振动分析

An Analysis Method for Wind-Wave Coupling Induced Random Vibration of Sea-Crossing Super-Large Bridges

应用数学和力学. 2017, 38(1): 75-89 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.370553>

地震作用下管道-土耦合结构非平稳随机振动分析

Non-Stationary Radom Vibration Analysis of Coupled Pipeline-Soil Systems Under Earthquake

应用数学和力学. 2018, 39(5): 493-505 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.380333>

水下训练服浮力配平的整数非线性规划方法

An Integer Nonlinear Programming Method for Underwater Training Spacesuit Buoyancy Balancing

应用数学和力学. 2020, 41(3): 260-267 <https://doi.org/10.21656/1000-0887.400083>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

水下穿越管道悬空段三级安全评价*

杨 涛¹, 郭 旭², 成志强¹, 帅祝名¹, 胡 聪¹

(1. 西南交通大学 力学与航空航天学院; 应用力学与结构安全四川省重点实验室, 成都 610031;
2. 国家管网集团北方管道公司 管道科技研究中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 水下穿越管道由于河床的不平整以及水流冲击、掏蚀作用, 易产生裸露、悬空等现象, 悬空管段在水流作用下跨度逐渐增大, 会威胁管道运营安全。为探究水流冲击作用下悬空管段的受力特性和失效行为, 根据管道破坏形式, 对管道进行静力学分析和动力学分析, 提出了含悬空段穿越管道的分级安全评价方法: 首先, 根据管道悬空段受力特性和应力状态, 进行“静载荷工况下的静强度安全评价”(1级); 其次, 根据悬空管道的固有振动频率与水流的涡旋发放频率的关系, 进行“动载荷工况下的共振安全评价”(2级); 最后, 根据管道的环境工况和载荷作用, 分析管道交变应力的周期性变化过程, 求解管道的疲劳损伤和疲劳寿命, 进行“动载荷工况下的疲劳强度安全评价”(3级), 从而提出水下穿越管道悬空段的三级安全评价方法。同时, 提出了不满足安全评价的稳管措施, 结合算例给出具体求解计算流程, 为水下穿越管道悬空段的安全评价提供了一定的理论参考。

关键词: 水下穿越管道; 悬空段; 受力特性; 涡激振动; 疲劳损伤; 安全评价

中图分类号: TE973.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.430294

Three-Level Safety Evaluation of Suspended Sections of Underwater Buried Pipelines

YANG Tao¹, GUO Xu², CHENG Zhiqiang¹, SHUAI Zhuming¹, HU Cong¹

(1. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Southwest Jiaotong University;
Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610031, P.R.China;
2. Pipeline R&D Center, Pipe China North Pipeline Company, Langfang, Hebei 065000, P.R.China)

Abstract: The uneven riverbed, and the impact and scour actions by water flow, make the underwater buried pipeline vulnerable to exposure and suspension, and endanger the pipeline operation safety. To investigate the mechanical properties and failure behaviors of the suspended pipeline section under water impact, according to the failure mechanism of the pipeline, the statics and dynamics analyses of the pipeline were carried out, and the graded safety evaluation technique for the buried pipeline with suspended sections was presented. First, a “static strength safety evaluation under static loads” (level 1) was conducted according to the mechanical features and stress states of the pipeline’s suspended section. Second, a “resonance safety evaluation under dynamic loads” (level 2) was conducted based on the correlation between the natural vibration frequencies of the suspended pipeline and the vortex emission frequencies of water flow. Finally, the periodical change process of the pipeline’s alternating stress was studied to solve the fatigue damage and fatigue life of the pipeline.

* 收稿日期: 2022-09-23; 修订日期: 2022-12-31

基金项目: 山西省交通科学研究院集团创新发展项目(20-JKCF-48)

作者简介: 杨涛(1996—), 男, 硕士生(E-mail: yangt0316@163.com);

成志强(1969—), 男, 教授, 博士(通讯作者. E-mail: zqcheng@netease.com).

引用格式: 杨涛, 郭旭, 成志强, 帅祝名, 胡聪. 水下穿越管道悬空段三级安全评价[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(2): 220-228.

and the “fatigue strength safety evaluation under dynamic loads” (level 3) was performed. Thus, a 3-level safety assessment procedure for pipelines with suspended sections was proposed. The stabilizing measures for pipelines of poor safety were suggested, and through an example, a specific calculation process was provided. The work serves as a theoretical guide for the safety evaluation of the suspended sections of underwater buried pipelines.

Key words: underwater buried pipeline; suspended section; mechanical characteristics; vortex-induced vibration; fatigue damage; safety evaluation

0 引 言

管道运输以其连续、高效、方便、运输成本低等优点,已经在工程中得到了广泛的应用.我国穿越河流的管道在油气输送管道工程中占一定数量,早期的穿越管道设计施工水平有限,有些未能达到设计深度^[1],由于地质演变、基岩裸露及泥沙冲蚀等因素,易造成部分管道产生裸露、悬空的现象,在水流冲击作用下,管道悬空段的离地间隙逐渐增大,最后完全暴露在水流冲击中,导致管道易发生弯曲变形、共振乃至断裂等一系列破坏,会对社会造成巨大的经济损失以及对管道周围的水资源造成污染.根据我国近年来水下穿越管道的事故统计^[2],超过 80% 的穿越管道事故均来自管道悬空后发生的破坏.因此,研究水流作用下穿越油气管道的强度安全评价方法具有重要意义,本文提出管道悬空段的三级安全评价方法.

目前对于穿越管道的研究主要集中在海底管道.由于海床面的不平整以及潮汐、海浪对管道周围砂土的冲蚀作用,海底管道逐渐产生裸露、悬空现象^[3].悬空管道在波浪作用下,导致管线悬空段出现离地间隙、两端边界条件以及轴向应力等多种状态的变化,在海流冲刷下可能产生周期性的漩涡发放,导致悬空管道产生涡激振动,由涡激振动引起的交变应力作用会影响管道的疲劳寿命,并对管道产生累计的疲劳损伤^[4].

在对水下穿越管道相关问题的研究工作中, Park 等^[5]分析了悬空管道在海流作用下的静力和动力响应,并计算出海底管道悬空段的临界长度,为管道的治理提供依据. Kantardgi 等^[6]研究了管道悬空段在水流和波浪共同作用下的稳定性,分析了对管道产生影响的载荷,为海底管道的设计和运行安全提供参考.在悬空管道产生的涡激振动方面, Xu 等^[7]从静态和动态的角度研究了多跨管道的相互作用机理,计算了管道在不同载荷工况下的固有频率,分析了管道悬空段发生涡激振动的动力响应. Choi^[8]推导了不同海况边界条件下,悬空管道特征方程的解析解,并讨论了边界条件对管道悬空段固有频率的影响. 张凯凯等^[9]利用直接多尺度法分析,推导了偏微分-积分控制方程,得到了管道 3:1 内共振下参激振动的近似解析解.在悬空管道产生的疲劳损伤方面,黄小光等^[10]通过模态分析和谱分析方法确定了海底管道在不同海流工况下对应的应力响应,结合 $S-N$ 曲线研究了海流作用下管道悬空段的疲劳损伤. Yttervik 等^[11]进一步分析了海流速度和方向对海底悬空管道疲劳失效的影响.在研究管道安全评价方面,向敏等^[12]构建了洪水管道有限元模型,分析了水流冲击下的管道载荷特征以及动、静水浮力下悬空段的弯曲变形与应力分布,构建了水下穿越管道强度安全评价准则.

在上述研究中,大部分管道研究主要集中在海底,大多是对海底管道悬空段的部分工况进行分析,针对河流管道的安全评价研究较少,缺乏系统性的水下穿越管道安全评价流程.而内陆河流域中水下穿越管道与海底管线不同,海洋流域的潮汐、海浪复杂多变,两者的流场差异大,管道载荷特征及受力情况也不一致^[13].因此,本文结合海底管道的研究成果,提出了水下穿越管道悬空段的安全评价方法,为管线工程的安全营运和治理决策提供一定的理论参考.

1 三级安全评价方法

国内油气管道安全管理的风险评价技术应用基本处于半定量化分析水平,工程界和力学界进行了大量风险分析研究和评估现有管线的服役安全状况、延长其使用年限.确定在不同的荷载工况和环境因素对管道强度、断裂和疲劳寿命可靠性的影响,从安全性方面对管线作出客观、及时的评价,对管道的力学响应特征进行分析,包括静力学分析和动力学分析,用分级评价的方法,依次进行“静载荷工况下的静强度安全评价”(1级)、“动载荷工况下的共振安全评价”(2级)和“动载荷工况下的疲劳强度安全评价”(3级).

管道安全评价流程如图1所示. 首先需确定穿越管道的参数类型: ① 管道悬空段参数, 如管道悬空段长度, 离地间隙比等; ② 管道几何、运行参数, 如管道直径、厚度等几何参数和运行内压、内部输送介质等管道运行参数; ③ 水流冲击作用参数, 如水流速度、运动黏滞系数等, 依次对管道进行分级安全评价. 首先, 静强度安全评价, 对悬空管道所受载荷类型进行分析, 明确悬空管道的载荷情况并对其进行定量计算, 得到管道在载荷作用下的应力状态, 根据强度准则, 分析管道是否会发生静强度破坏. 若满足, 则对管道进行动载荷工况下的共振安全评价. 根据 DNV-RP-F105 规范, 对不同长细比的悬空管道进行了特征划分. 对于需要考虑涡激振动的悬空管道, 计算管道固有频率和水流涡旋发放频率, 确定管道是否发生共振. 若管道满足动强度安全评价, 则认为管道满足服役要求. 若管道发生涡激振动, 则对管道进行动载荷工况下的疲劳强度安全评价, 计算水下穿越管道在水流冲击作用下的疲劳损伤和疲劳寿命. 若管道不满足疲劳强度安全评价, 则采取稳管措施, 若满足三级安全评价要求, 则管道满足服役要求.

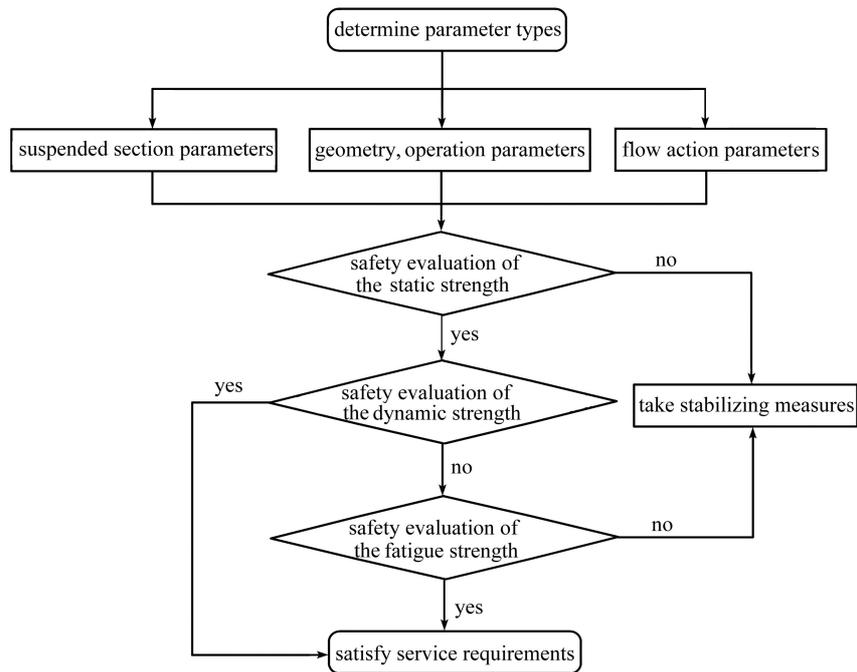


图1 管道安全评价流程图

Fig. 1 The pipeline safety evaluation flowchart

2 三级安全评价流程

水下穿越管道的安全评价是针对产生悬空现象的水下输流管道, 安全评估分为三个步骤: ① 校验水下穿越管道在静载荷作用下是否满足强度要求; ② 校验水下穿越管道在脉动载荷作用下是否发生涡激共振; ③ 校验发生涡激振动的悬空管道的疲劳寿命是否满足服役年限要求.

2.1 静强度评价

水下穿越管道悬空段所受载荷如图2所示, 悬空管道所受载荷类型主要有管道及油气自重、水浮力、管道内压, 水流冲击作用下的水力载荷和悬空两端管土相互作用摩擦力.

在自重方面, 将油气产生的自重等效为管道密度增加量, 进而通过管道等效密度就可以表示不同输送介质所产生的自重影响. 管道除了受到沿流向的稳定拖曳力, 还会受到沿流向的脉动拖曳力和垂流向的脉动上升力, 脉动拖曳力的频率为脉动上升力的两倍. 设管道悬空段长 L , 密度为 ρ_e , 外径为 D , 内径为 d , 壁厚为 t , 安全系数为 γ_s .

管道单位长度的重力为

$$G = Mg = \rho_e g \frac{\pi}{4} D^2; \quad (1)$$

管道单位长度所受的浮力为

$$F_b = \rho_w g V_s = \rho_w g \frac{\pi}{4} D^2; \tag{2}$$

管道单位长度所受的稳定绕流拖曳力 f_D 为

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w D V_0^2; \tag{3}$$

管道单位长度所受的横向脉动上升力 f_L 为

$$f_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w D V_0^2 \cos(2\pi f_0 t); \tag{4}$$

管道单位长度所受的流向脉动拖曳力 f'_D 为

$$f'_D = \frac{1}{2} C'_D \rho_w D V_0^2 \cos(4\pi f_0 t), \tag{5}$$

式中, ρ_w 为流体的密度, kg/m^3 ; V_0 为河流垂直于管体的流速, m/s ; f_0 为河流的涡旋发放频率, Hz ; C_D 为绕流拖曳力系数; C_L 为脉动上升力系数; C'_D 为脉动拖曳力系数; C_D , C_L 和 C'_D 与 Reynolds 数相关.

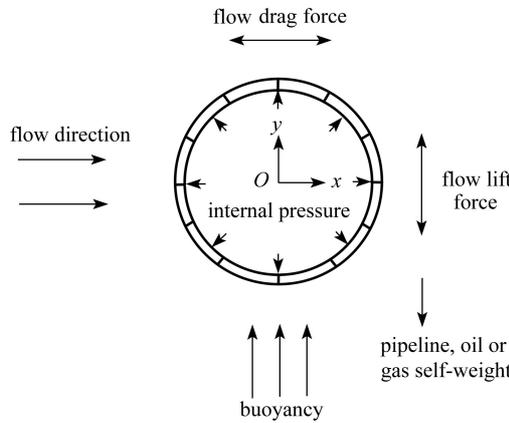


图 2 管道悬空段所承载荷

Fig. 2 Loads on the suspended section of the pipeline

根据水下穿越管道承受静力载荷和水力载荷的受力特性, 将悬空管道单位长度所承载的力简化为均布载荷 q . 对于管道所受的脉动拖曳力 f'_D 和所受的脉动上升力 f_L , 静强度分析时取其幅值最大值代入计算. 为简化管道与水流的夹角和悬空两端高度差的影响, 在强度安全评价时, 将单位长度管道所受的均布载荷叠加在一起. 管道悬空段单位长度所承受的均布载荷 q 的计算公式为

$$q = G - F_b + f_D + f_L + f'_D = g \frac{\pi}{4} (\rho_e D^2 - \rho_w D^2) + \frac{1}{2} C_D \rho_w A V_0^2 + \frac{1}{2} C_L \rho_w D V_0^2 \cos(2\pi f t) + \frac{1}{2} C'_D \rho_w D V_0^2 \cos(4\pi f t). \tag{6}$$

根据管道悬空段两端土体对管道约束强弱程度和承受均布载荷的受力特性, 将悬空段简化为受均布载荷作用的简支梁结构. 由于未考虑管道振动和管道与水流间的摩擦, 实际管线工程与简化模型存在一定误差. 管道的轴向应力主要由其承受的均布载荷作用下产生的弯矩 M 引起, 按结构力学理论, 最大弯矩出现在梁结构中间位置, 应力计算公式为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} D}{2I_z} = \frac{qL^2 D}{16I_z}, \tag{7}$$

式中, I_z 为管道截面惯性矩, m^4 . 当 $\sigma_{\max} < [\sigma]/\gamma_S$ 时, 管道满足静强度评价要求, 需进行涡激振动评价.

2.2 涡激振动评价

当河水流经悬空管道时, 因 Reynolds 数大小的不同, 会出现不同形式的漩涡发放现象, 如图 3 所示. 管道迎水面、背水面以及管道顶部、底部形成压强差, 从而导致悬空管道发生涡激振动现象. 根据 DNV-RP-F105 规范给出了悬空管道分类, 当悬空管道的长细比为 $L/D < 30$ 时, 悬空管道由环境载荷引起的响应振幅很小, 发生涡激振动的可能性很低, 一般不需要进行涡激振动的校核. 当悬空管道的长细比为 $L/D > 30$ 时, 如果水

流涡旋发放频率 f_0 与悬空管道的固有频率 f_n 两者接近,水下穿越管道悬空段将发生共振.

水流涡旋发放频率 f_0 的计算公式如下:

$$f_0 = \frac{Sr \cdot V_0}{D}, \quad (8)$$

式中, Sr 表示 Strouhal 数; V_0 表示来流的速度, m/s; D 表示管道外径, m.

水下穿越管道的固有频率 f_n 的计算公式如下:

$$f_n = \frac{CK^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{M_p}}, \quad (9)$$

式中, C 为介质系数; K 为约束条件系数; E 为管材弹性模量, Pa; I 为钢管截面惯性矩, m^4 ; L 为悬空段长度, m; M_p 为单位长度等效质量, kg/m, 包括管道自身质量、输送介质的质量以及管道排开水体积的质量.

当水流涡旋发放频率 f_0 与悬空管道的固有频率 f_n 两者接近时,对于水下穿越管道,一般认为当 $f_n = (0.7 \sim 1.3)f_0$ 时,在范围内^[2],水下穿越管道将发生共振.此时悬空管道的涡激振动可能导致管道强度破坏或者疲劳破坏.在水下穿越管道设计中,必须避免或者控制发生“共振”现象,可以通过改变悬空段的长度来改变管道在水流冲击作用下的固有频率.当管道可能发生共振时,需进行疲劳强度安全评价.

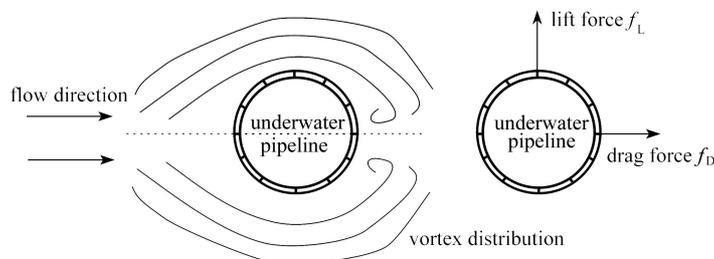


图3 管道涡旋发放示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the pipeline vortex emission

2.3 疲劳强度评价

当悬空管道的固有振动频率与河流流经管道的漩涡发放频率较接近时,悬空管道将出现周期性振动,由涡激振动引起的交变载荷作用,不仅影响管道的服役寿命,可能导致管道的累计疲劳破坏^[14].由于水流作用下悬空管线所受到的脉动上升力一般远大于脉动拖曳力,管线在垂直水流方向的横向振动幅度一般远大于沿水流方向的流向振动幅度^[15],以下关于水下管道悬空段的疲劳强度分析将针对垂直水流方向上的横向振动问题展开.

管道上的总应力由两部分组成,一部分是管道自重、浮力、流向方向稳定的冲击力造成的静应力;另一部分是管道横向方向上所受的脉动循环力造成的交变应力.本文研究的水下穿越管道,管道承受的载荷形式为恒幅循环,首先确定横向涡激振动幅值,由振动幅值计算交变应力的应力幅值.根据水下穿越管道既定参数以及载荷工况,依据 DNV-RP-F105 规范标定横向涡激振动幅值与折合速度的关系曲线.

折合速度 V_R 是一个无量纲的物理量,计算公式为

$$V_R = \frac{V_0}{f_n D}. \quad (10)$$

根据折合速度,由横向涡激振动幅值与折合速度的关系曲线,可确定横向涡激振动的幅值 A_X^* .横向涡激振动交变应力幅值 S_{CF} 的计算公式为

$$S_{CF} = 2A_{CF} A_X^* R_K \gamma_S, \quad (11)$$

式中, A_{CF} 表示单位直径管道横向振动时的应力幅值, Pa; A_X^* 为横向涡激振动的幅值; R_K 为缩减因子; γ_S 为安全系数.

计算管道由涡激振动造成的疲劳损伤时,工程中常用 $S-N$ 曲线来表示结构的疲劳强度.其中, S 是交变应力的应力幅值, N 是结构在应力幅值为 S 的恒幅交变应力作用下发生疲劳破坏需要的循环次数^[16].根据

Miner 线性累积损伤理论, 结构在多级恒幅交变应力作用下, 总的疲劳损伤度 D_{fat} 是各应力范围水平下的损伤度 D_i 之和. 假设应力范围有 K 级, 某一应力范围水平下的损伤度 D_i , 为该交变应力范围的实际循环次数 n_i 与管道在单一应力幅值作用下达到疲劳破坏所需的循环次数 N_i 之比, 则悬空管道破坏时的疲劳累计损伤度为

$$D_{\text{fat}} = \sum_{i=1}^K \frac{n_i}{N_i}. \quad (12)$$

涡激振动产生的管道横向响应频率 f_v 与管道固有频率 f_n 之间的关系式如下:

$$f_v = f_n \sqrt{\frac{m^* + 1}{m^* + C_{\text{AO}}/C_A}}, \quad (13)$$

式中, C_A 为静水附加质量系数; C_{AO} 为横向振动时的附加质量系数; m^* 表示质量比, $m^* = 4m_p/(\pi\rho_w D^2)$, m_p 为单位长度等效质量, kg/m.

水下穿越管道横向疲劳寿命为

$$T = N_i \frac{1}{f_v}, \quad (14)$$

式中, N_i 为交变应力下的疲劳循环总数; f_v 为悬空管道的横向响应频率, Hz.

经以上步骤便可以求得水下穿越管道的疲劳寿命, 根据管道服役年限判断疲劳寿命是否满足要求. 当任何一项评价不满足时, 需采取安全防控措施.

2.4 稳管措施

当水下穿越管道三级评价中的任何一项不满足时, 需要采取相应的稳管补救措施, 严重情况下需要做换管处理. 工程中常见的稳管补救措施主要有: ① 河床干预措施; ② 仿生草技术; ③ 安装扰流装置.

河床干预措施的原理是通过不同的施工方法来缩短悬空管道的悬空长度, 使管道的悬空长度小于实际工况下的临界长度. 悬空长度是影响水下穿越管道结构安全评价结果的最重要因素. 通过在悬空管道离地间隙处安装钢结构支撑架, 或者在管道下方放置水泥沙袋等填充物^[1], 从而达到缩短管道悬空长度的目的. 在河底安置仿生水草可以减小水流的速度, 影响水流的涡旋发放频率, 从而减小管道发生涡激振动的可能性, 避免管道的破坏. 仿生水草具有黏滞阻尼作用, 可以促使悬空管道下的泥沙淤积, 减小管道离地间隙. 在悬空管线上安装绕流装置, 如在管壁上平行或螺旋的布置翼板构件和飘带构件, 可以改变河流流经管道时尾部的涡旋发放频率, 促进涡旋的脱落, 避免管道发生共振.

3 算例与分析

水下穿越输油管道外径 $D=0.508$ m, 壁厚 $t=10$ mm, 管道悬空长 $L=50$ m. 管钢材料为 X60 钢, 弹性模量 $E=200$ GPa, Poisson 比为 0.3, 屈服强度为 420 MPa, 安全系数 γ_S 为 1.5, 钢的密度为 7 850 kg/m³, 油液的密度为 900 kg/m³, 等效密度为 1 170 kg/m³. 水的密度为 1 000 kg/m³, 水流速度 V_0 为 1 m/s, 流体运动黏滞系数 ν 为 1×10^{-5} m²/s. 管道悬空段离地间隙比 $e/D=1.57$, 水下穿越管道边界条件简化为简支梁结构. 下面依次进行三级安全评价计算分析.

3.1 静强度安全评价

在工程应用中, 对于水下穿越管道, 其 Reynolds 数变化范围大概在 $10^5 \sim 10^7$ 之间, Reynolds 数计算:

$$Re = \frac{V_0 D}{\nu} = \frac{1 \times 0.508}{1 \times 10^{-6}} = 5.08 \times 10^5. \quad (15)$$

由 Reynolds 数及管道载荷工况确定稳定拖曳力系数 C_D 取 0.4, 脉动横向力系数 C_L 取 0.07, 脉动拖曳力系数 C'_D 取 0.6. 静强度安全评价时, 将所有的载荷都叠加在一起进行计算, 余弦取其幅值最大值代入计算, 管体所受均布载荷为

$$q = g \frac{\pi}{4} (\rho_c D^2 - \rho_w D^2) + \frac{1}{2} C_D \rho_w D V_0^2 + \frac{1}{2} C_L \rho_w D V_0^2 \cos(2\pi f t) + \frac{1}{2} C'_D \rho_w D V_0^2 \cos(4\pi f t) = 344.4 + 101.6 + 17.8 + 152.4 = 616.2 \text{ N/m}. \quad (16)$$

对于简支梁结构,当管道承载示的均布载荷 q 时,管道最大轴向应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}D}{2I_z} = \frac{qL^2D}{16I_z} = \frac{616.2 \times 50^2 \times 0.508}{16 \times 4.84 \times 10^{-4}} = 101 \text{ MPa}, \quad (17)$$

式中,钢管的截面惯性矩为 $I_z = 3.14D^4(1-\alpha^4)/64 = 4.84 \times 10^{-4} \text{ m}^4$.

X60 钢的屈服强度为 420 MPa, $\sigma_{\max} < [\sigma]/\gamma_S = 280 \text{ MPa}$, 管道满足静强度安全评价.

3.2 动强度安全评价

穿越管道悬空段的长细比为 $L/D = 50/0.508 = 98.4 > 30$, 悬空管道由环境载荷引起的响应振幅较大,发生涡激振动的可能性较高,需要进行涡激振动的校核.

河流流经水下穿越管道在尾部会发生涡旋释放,涡旋释放频率的计算公式为

$$f_0 = \frac{Sr \cdot V_0}{D} = \frac{0.2 \times 1}{0.508} = 0.393 \text{ Hz}, \quad (18)$$

式中, Sr 与 Reynolds 数有关,取 0.2.

水下穿越管道悬空段固有频率的计算公式为

$$f_n = \frac{CK^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_p}} = \frac{0.7 \times 3.92^2}{2 \times 3.14 \times 50^2} \sqrt{\frac{200 \times 4.84 \times 10^5}{(1\ 170 + 1\ 000) \times \frac{\pi}{4} \times 0.508^2}} = 0.321 \text{ Hz}, \quad (19)$$

式中, C 对于水下管道取 0.7; K 为约束条件系数,管体在简支梁约束下取 3.92; L 为管道悬空段长; E 为钢管的弹性模量; I 为钢管截面惯性矩; $m_p = (\rho_e + \rho_w)A$, 为单位长度等效质量,包括管道自身质量、输送介质的质量以及排开水的质量.

由 $f_n = (0.7 \sim 1.3)f_0 = 0.275 \sim 0.511$, f_n 在这个范围内,此时悬空管道可能发生共振,由此可能导致管道强度破坏或者疲劳破坏,管道需进行疲劳强度安全评价.

3.3 疲劳强度安全评价

折合速度 V_R 的计算公式为

$$V_R = \frac{V_0}{f_n D} = \frac{1}{0.321 \times 0.508} = 6.132 \text{ m/s}. \quad (20)$$

依据 DNV-RP-F105 规范,载荷工况下悬空管道的横向振动幅值标定曲线如图 4 所示.

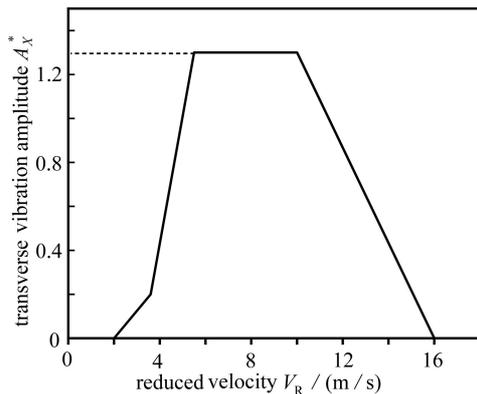


图 4 横向振动幅值 A_x^* 与折合速度 V_R 关系曲线

Fig. 4 The relation curve between transverse vibration amplitude A_x^* and reduced velocity V_R

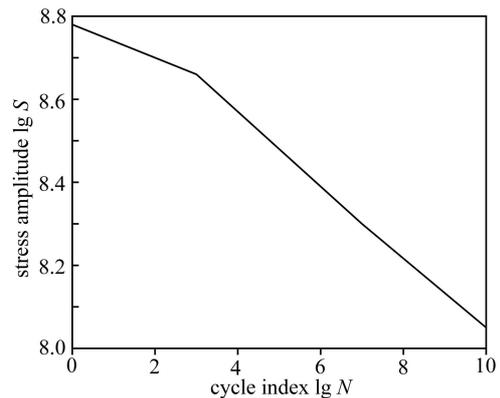


图 5 碳钢 RQT501 的 S-N 曲线

Fig. 5 The S-N curve of carbon steel RQT501

本算例中 $V_R = 6.132 \text{ m/s}$, 横向涡激振动的幅值 A_x^* 为 1.3. 横向涡激振动交变应力幅值 S_{CF} 的计算公式为

$$S_{CF} = 2A_{CF}A_x^*R_K\gamma_S = 2 \times 63.85 \times 1.3 \times 0.97 \times 1.3 = 209.33 \text{ MPa}, \quad (21)$$

式中, $A_{CF} = C_4 \frac{D(D_s - t)E}{L_{\text{eff}}^2} = 4.93 \times \frac{0.508 \times (0.508 - 10^{-2}) \times 200 \times 10^9}{62.5^2} \text{ Pa} = 63.85 \text{ MPa}$ 为单位直径悬空管道横向振

动时的应力幅值; C_4 为边界因子, 两端简支时取为 4.93; D 表示钢管外径, D_s 为管道外径(包含涂层); L_{eff} 为横向有效悬空段长, 取 62.5 m; A_x^* 为横向涡激振动的幅值; 缩减因子 R_K 取 0.97; 安全系数 γ_S 取 1.3.

采用了碳钢 RQT501 的 $S-N$ 曲线计算穿越管体的横向疲劳寿命, 该材料的 $S-N$ 曲线如图 5 所示.

穿越管道悬空段在水流的冲击作用下, 垂直水流方向上的交变应力的幅值为 $S_{\text{CF}}=209.33$ MPa, 由 $\lg S_{\text{CF}}=8.32$, 由碳钢 RQT501 的 $S-N$ 曲线可以标定出循环次数为 $N=10^7$. 对于碳钢 RQT501 材料, 循环次数为 10^{10} 次时认为是无限寿命, 本算例的循环次数为 10^7 次.

管体横向响应频率 f_v 的计算如下:

$$f_v = f_n \sqrt{\frac{m^* + 1}{m^* + C_{\text{AO}}/C_A}} = 0.321 \sqrt{\frac{2.17 + 1}{2.17 - 0.5/1}} = 0.442 \text{ Hz}, \quad (22)$$

式中, f_n 为管体的固有频率; 由间隙比 e/D 大于 0.8, 静水附加质量系数 C_A 取为 1; 横向振动时的附加质量系数 C_{AO} 与折合速度 V_R 相关, 取 -0.5; m^* 表示质量比, $m^* = \frac{4m_p}{\pi\rho_w D^2} = \frac{\rho_w + \rho_e}{\rho_w} = 2.17$; m_p 为单位长度等效质量, kg/m.

水下穿越管道横向疲劳寿命为

$$T = N_i \frac{1}{f_v} = 10^7 \times \frac{1}{0.422} = 2.37 \times 10^7 \text{ s} \approx 0.75 \text{ a}. \quad (23)$$

经过以上步骤便可以求得水下穿越管道的疲劳寿命, 所求悬空管道疲劳寿命不满足服役要求, 需采取稳管措施. 本例中管道悬空段发生涡激振动, 可在河底安置仿生水草来减小水流的速度, 改变水流的涡旋发放频率, 从而减小管道发生涡激振动的可能性, 避免管道的破坏, 同时仿生水草可以促进泥沙淤积, 改变管道悬空长度.

4 结 论

本文对水下穿越管道悬空段的结构安全进行评估. 结合海底管道的研究成果, 提出了水下穿越管道安全评价方法, 采用三级评价的方式, 依次进行静强度安全评价、共振安全评价、疲劳强度安全评价. 根据管道参数及所承载荷工况, 进行安全评价的理论分析, 给出了三级安全评价的具体内容和计算方法, 总结了不满足评价要求情况下的稳管措施. 结合算例验证了三级评价方法在管道悬空段的应用, 并得到了管道的最大弯曲应力、涡激振动频率以及疲劳损伤和疲劳寿命. 对于出现裸露、悬空现象的水下穿越管道, 可为管道的安全营运及维修治理提供一定的理论参考, 预防和减少水下穿越管道的安全事故.

参考文献(References):

- [1] 王蒙蒙. 基于DNV规范的海底管线悬跨分析[D]. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2014. (WANG Mengmeng. Submarine pipeline span analysis based on DNV standard[D]. Master Thesis. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese))
- [2] 李亮亮, 朱洁, 韩冰. 穿越河流管道悬跨安全长度判定[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 86-90. (LI Liangliang, ZHU Jie, HAN Bing. Determining the safety length of suspended span of river-crossing pipelines[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research*, 2014, 31(2): 86-90. (in Chinese))
- [3] 谢英, 麻秀芬, 宁海峰. 海底悬跨管道形成及破坏机理[J]. 油气储运, 2017, 36(12): 1436-1442. (XIE Yin, MA Xiufen, NING Haifeng. Formation and damage mechanism of free spanning submarine pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(12): 1436-1442. (in Chinese))
- [4] 袁嘉瑞, 丁虎, 陈立群. 微曲输流管道振动固有频率分析与仿真[J]. 应用数学和力学, 2022, 43(7): 719-726. (YUAN Jiarui, DING Hu, CHEN Liqun. Analysis and simulation of natural frequencies of slightly curved pipes[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, 43(7): 719-726. (in Chinese))
- [5] PARK H I, KIM C H. Analytical methods for the determination of allowable free span lengths[C]//*Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Honolulu, Hawaii, USA, 1997.
- [6] KANTARDGI I G, GOGIN A G. Submarine pipeline stability under stream and waves action[J]. *Power Technology and Engineering*, 2021, 55(3): 367-372.

- [7] XU W H, JIA K, MA Y, et al. Multispan classification methods and interaction mechanism of submarine pipelines undergoing vortex-induced vibration[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, **120**: 103027.
- [8] CHOI H S. Free spanning analysis of offshore pipelines[J]. *Ocean Engineering*, 2001, **28**(10): 1325-1338.
- [9] 张凯凯, 谭霞, 丁虎, 等. 超临界输流管道3:1内共振下参激振动响应[J]. 应用数学和力学, 2018, **39**(11): 1227-1235. (ZHANG Kaikai, TAN Xia, DING Hu, et al. Parametric vibration responses of supercritical fluid-conveying pipes in 3:1 internal resonance[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(11): 1227-1235.(in Chinese))
- [10] 黄小光, 韩忠英. 海底管道疲劳损伤与疲劳寿命的可靠性计算[J]. 油气储运, 2010, **29**(11): 827-831. (HUANG Xiaoguang, HAN Zhongying. Reliability calculation of fatigue damage and fatigue life of submarine pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2010, **29**(11): 827-831.(in Chinese))
- [11] YTTERVIK R, LARSEN C M, FUMES G K. Fatigue from vortex-induced vibrations of free span pipelines using statistics of current speed and direction[C]//*Proceedings of OMAE*. Cancun, Mexico, 2003: 687-698.
- [12] 向敏, 刁洪涛, 张子涛, 等. 水下穿越油气管道水流冲击作用下强度安全研究[J]. 工业安全与环保, 2017, **43**(5): 66-68. (XIANG Ming, DIAO Hongtao, ZHANG Zitao, et al. Study on strengthen safety of oil and gas pipelines under the impact of water flow[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2017, **43**(5): 66-68.(in Chinese))
- [13] 杨庆华, 张宇倩, 杨乾, 等. 水下穿越管道悬空段受力特性的试验研究[J]. 工程科学与技术, 2021, **53**(2): 19-27. (YANG Qinghua, ZHANG Yuqian, YANG Qian, et al. Experimental study on the loading capacity of suspended section of underwater crossing pipeline[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, **53**(2): 19-27.(in Chinese))
- [14] 柳军, 郭晓强, 刘清友, 等. 考虑顺流向和横流向耦合作用的海洋立管涡激振动响应特性[J]. 石油学报, 2019, **40**(10): 1270-1280. (LIU Jun, GUO Xiaoqiang, LIU Qinyou, et al. Vortex induced vibration response characteristics of marine riser considering the in-line and cross flow coupling effect[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, **40**(10): 1270-1280.(in Chinese))
- [15] 申国兵. 考虑管土作用的海底多跨管道振动特性研究[D]. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2015. (SHEN Guobin. Vibration characteristics of subsea multi-span pipe considering pipe-soil interaction[D]. Master Thesis. Tianjin: Tianjin University, 2015. (in Chinese))
- [16] 恽秋琴, 艾尚茂, 孙丽萍. 海底多跨管道涡激振动疲劳简化分析[J]. 中国造船, 2010, **51**(4): 111-117. (YUN Qiuqin, AI Shangmao, SUN Liping. Simplified fatigue analysis on the vortex induced vibration of the multi-spanning subsea pipeline[J]. *Shipbuilding of China*, 2010, **51**(4): 111-117.(in Chinese))