

考虑边界土体性质悬跨管道振动特性分析

胡家顺*, 冯新, 周晶

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 海底管道是海洋油气传输的生命线,其悬跨段的固有频率是决定动力响应状态的关键.建立了考虑边界土体性质的悬跨管道计算模型,通过土弹簧动刚度的变化描述海床土体性质的变异.在此基础上进行悬跨管道的固有振动特性分析,分别讨论了边界土体性质、外部环境荷载、管道轴向力以及悬跨长度等变化对管道固有频率的影响.结果显示:跨长对管道固有频率影响最为明显,且对于不同的影响因素,悬跨管道的频率呈现不同的变化特征.

关键词: 悬跨管道;土体性质;环境荷载;轴向力;跨长

中图分类号: TE832; O327 **文献标志码:** A

0 引言

管道运输是油气运输中最快捷、经济、可靠的方式.海底管道作为海上油气传输系统的重要设施,在海上油气田开发过程中起到了重要的作用,被喻为海上油气田的生命线.由于海流冲刷、淘蚀作用以及海床的崎岖不平,海底管道出现悬跨段是不可避免的.悬跨段的出现明显增大了管道的失效概率,如果悬跨管道的固有频率接近或者等于涡激频率,则会发生涡激共振现象,从而引起管道结构的疲劳损伤,严重威胁海底管道的安全.海底管道一旦失效,造成的相关损失是十分巨大的.悬跨管道的固有频率是决定其动力响应状态的关键,因此,进行管道悬跨段固有频率的影响因素分析是研究其动力响应和疲劳破坏的基础^[1~3].

国内外学者对悬跨管道动力特性进行了大量的研究^[2~10]. Xu等^[3]研究了多跨海底管道的波激疲劳问题,使一种考虑轴向力的海底悬跨管道频率求解方法得到了发展; Furnes等^[4]研究了悬跨管道在海流作用下的一些动力特性,并通过试验进行了验证; Larsen等^[5]进行了悬跨管道涡激振动的频域和时域分析,提出了一种分析涡激振动的新策略; Choi^[6]推导了多种边界条件的梁式

悬跨管道特征方程的精确解,根据能量守恒定理进行了频率求解;罗延生等^[7]根据管跨端点支承土体特性,提出了一种确定悬跨管道模糊固有频率的方法.上述相关的研究还没有关于跨端边界土体性质、外部环境荷载、轴向力以及悬跨长度(以下简称跨长)对固有频率影响的详细而全面的讨论.也有些研究分析了轴向力、压强、内流等变化对允许跨长的影响^[8,9],但简单地把边界条件等效为简支约束,很难反映跨端边界土体性质对固有频率的影响.根据固有频率对悬跨管道跨长进行评估是海底管道设计阶段的内容之一,而目前采用的规范并没有考虑土壤性质变化对悬跨管道固有频率的影响.

本文考虑土体性质变化对跨端边界条件的影响,建立三向土弹簧约束的悬跨管道数值模型,并结合我国渤海、南海的部分海床土体性质、海底管道设计工艺,详细讨论跨端边界土体性质、外部环境荷载、轴向力以及跨长等对管道固有频率的影响.

1 悬跨管道数值模型

1.1 管道力学模型

实际中常见的悬跨管道结构如图1,中间为

海流冲刷引起的悬跨段,两端为平铺段.在海洋环境中,波浪将力通过管道传到边界土体中,使土体受力变形.在波浪力的长期循环作用下,跨端边界土体性质会发生一定程度的变化^[10].根据悬跨管道的结构型式和受力特点,建立如下的力学模型:管道为 Euler 梁式结构;管道的有效质量包括管道自身质量、内部流体质量及附加质量;两端土体对管道的约束作用可用 3 个方向上的线性土弹簧单元近似模拟,边界土体性质的变化可通过改变土弹簧刚度实现.

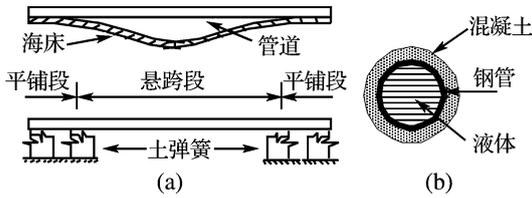


图 1 悬跨管道模型示意

Fig. 1 Sketch of free span pipeline model

1.2 土弹簧动刚度确定

海洋土土体性质复杂,在管道服役阶段,边界土体表现出一定的流变性和随机性.影响土体弹性系数的主要因素包括:塑性指数、抗剪强度、空隙率、循环次数等.通常这些物理指标,可由管道铺设路线勘测过程中的土壤采样试验获得,悬跨管道振动荷载的循环次数对土体弹性系数的影响可根据土体应变范围确定.

管道边界的土弹簧动刚度与土体的动剪切模量和泊松比有关.根据弹性半空间理论,假设悬跨管道两端入土段等效为弹性地基上半无限长梁,则竖向、横向土弹簧的动刚度^[11]可表示为

$$K_v = \frac{0.88G}{1-\nu}, K_l = 0.76G(1+\nu) \quad (1)$$

式中: K_v 、 K_l 为竖向、横向土弹簧动刚度; G 为土体的动剪切模量;轴向土弹簧动刚度 K_a 一般认为等价于 K_l ; ν 为土体的泊松比,砂土 ν 取 0.35,黏土 ν 取 0.45.

对于砂土,在小应变情况下,土体的最大剪切模量可表示为^[11]

$$G_{\max} = \frac{625 \times \sqrt{\sigma_a \sigma_s}}{0.3 + 0.7e_s^2} \quad (2)$$

式中: e_s 为土体空隙率; σ_a 、 σ_s 分别为大气压强、边界土体的平均有效应力, σ_s 可表示为

$$\sigma_s = B\gamma_s + \frac{\gamma_p}{3B} \left(1 + \frac{L}{2L_{sh}} \right) \quad (3)$$

其中 B 为管道与土体的接触宽度, γ_s 、 γ_p 分别为水下土体的单位体积重量(单位: kN/m^3)和水下管道的单位长度重量(单位: kN/m), L 为跨长, L_{sh} 为悬跨管道肩部的支承长度,用于传递悬跨管道的一半重量.

对于黏土,在小应变情况下,土体的最大剪切模量可表示为^[10]

$$G_{\max} = 300S_u/I_p \quad (4)$$

式中: S_u 为黏土的不排水剪切强度; I_p 为黏土的塑性指数.

1.3 模型参数

我国在 2002 年发布了海底管道系统规范^[12],此规范主要以挪威船级社(DNV)海底管道标准^[13]为依托制定,只是总体给出海底管道设计的最低要求,涉及管道具体参数设计的内容较少.而 DNV 和美国船级社(ABS)在海底管道工程方面已有多年经验,因此本文参考 DNV、ABS 规范^[13,14]和美国石油协会(API)标准^[15],确定了所研究的悬跨管道模型参数,见表 1.海底管道为具有混凝土保护层的单层钢质管道,不计混凝土刚度的贡献.管道外部海水密度取 $1\,040 \text{ kg}/\text{m}^3$,管内流体密度为 $880 \text{ kg}/\text{m}^3$.

表 1 管道模型力学参数

Tab. 1 Mechanical properties of pipe model

参数	数值
钢管弹性模量/GPa	206
钢管外径/mm	324
钢管壁厚/mm	16
钢材密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
混凝土层厚度/mm	50
混凝土密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	3 040

注:模型中钢管型号为 API-5L-X60

2 悬跨管道固有振动影响分析

有些学者在研究中只对管道的基频感兴趣,认为二阶或二阶以上固有频率远离涡激发放频率,对悬跨管道振动幅值影响很小,不会引起疲劳损伤^[6,8,9],这一结论是建立在悬跨管道的跨长与直径之比(L/D)较小、外部流速较低基础上的.然而,在 L/D 较大、海底流速较高情况下,管道较高

阶次的固有频率也会被激励起来,而较高阶次频率对疲劳累计损伤的影响不可忽略^[11].因此,对悬跨管道进行多阶频率影响分析是有必要的.考虑到悬跨管道横向振动(cross-flow)的幅值相对较大,是造成疲劳破坏的主要原因,本文在对悬跨管道进行固有振动分析时重点讨论各因素对横向振动前3阶固有频率的影响.

2.1 边界土体性质对固有频率的影响

管道在正常运行阶段,出现的悬跨段受外部波浪和海流的作用,将产生交变的水动力载荷作用于跨端的支承土体.在这种循环振动荷载作用下,边界土体振动累积孔压的变化、主应力方向的不断改变,影响了土体的原有结构和强度;另外波浪产生的海底压力波作用,使海床产生瞬态的附加孔隙水压力和有效应力,引起了边界土体中孔压的动态累积和有效应力的不断改变.边界土体性质的变化,必然改变悬跨管道端部的约束能力,从而影响了悬跨管道的固有振动特性,我国已建成的海底管道多数铺设在近海区域,其中以滩海管道居多,而我国近海区域海床表层多为黏土,鉴于此,本文主要研究黏性土体性质变化对悬跨管道固有频率的影响.

不同性质的土体对悬跨管道边界约束作用是不同的.在动力作用下,随着悬跨的增长,管道对两端边界土体作用的影响范围也增大.关于悬跨管道管土相互作用模型跨肩部分计算长度取值,到目前为止,还没有系统性的指导和建议.针对该现状,本文根据大量数值分析结果,给出了悬跨管道模型跨肩部分计算长度的选取意见.在数值分析中假设悬跨管道的边界条件、轴向力状态稳定,依次取不同的计算长度来求解悬跨管道的固有频率,发现当跨肩部分计算长度大于1倍跨长以后,继续增加计算长度对固有频率计算结果几乎无影响,如图2所示.因此,选择1倍跨长作为跨肩部分的计算长度是合理的.

设管道外部水流方向垂直管道轴线,速度为常数取0.2 m/s,管道轴向力为0,跨长 $L=90D$ (D 为管道外径,包括混凝土层厚度,本文为0.424 m),研究黏性海床土体由很软状态过渡到很硬状态的悬跨管道固有频率变化特征.黏土性质的变化可用 S_u/I_p 表示, S_u/I_p 的大小反映了黏土的类型,

S_u/I_p 由小到大依次表示很软、软、中硬、硬、很硬黏土的状态.根据文献[11、16]中黏土物理参数资料,利用式(4)求得边界土体的动剪切模量,代入方程(1)即可获得土弹簧的动刚度.然后利用有限元数值方法求得管道的固有频率(见图3).

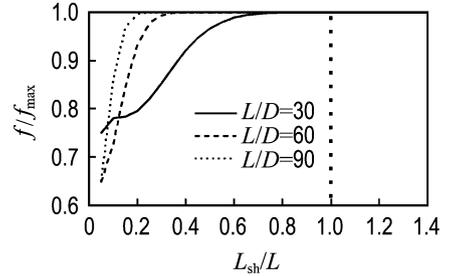


图2 不同跨肩计算长度管道的固有频率

Fig. 2 Natural frequencies of free span pipeline under different calculating length of shoulder

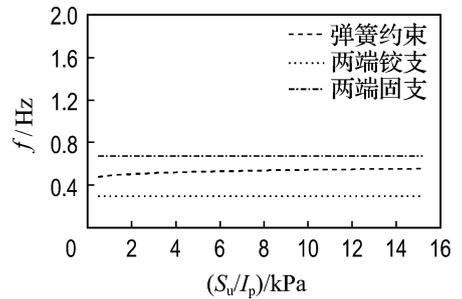


图3 悬跨管道的固有频率随土体性质变化

Fig. 3 Natural frequencies of free span pipeline in terms of clay performance variation

图3中也给出了由ABS(2006指南)^[13]计算得到的固有频率.两端铰支与两端固支条件下由该指南计算的固有频率分别为0.297、0.673 Hz;而对于不同性质的黏土,由本文方法计算得到的固有频率范围为0.481~0.556 Hz.通过对比发现:用ABS指南中的方法计算管道的固有频率过于保守,只能粗略地估计悬跨管道的频率范围;用本文方法能够较为准确地计算悬跨管道的固有频率,而且可以反映土体性质变化对固有频率的影响.

图4中给出了随边界土体性质变化管道前3阶的归一化频率值.从图中可以看出:(1)边界土体性质对管道前3阶固有频率影响明显,土体性质变化对各阶固有频率影响程度略有不同,黏土

从很软状态过渡到很硬状态对应的管道一阶、二阶、三阶固有频率分别增大 13.5%、14.4%、15.7%。(2)随着 S_u/I_p 的增大,即边界土体由很软到很硬状态,管道的固有频率逐渐增大,但增大速率逐渐减小.当土体的 S_u/I_p 较小时,管道固有频率受土体性质影响最为敏感,此时边界土体性质若出现较小的扰动,固有频率则会出现较大的变化.究其原因是当土体较软时,悬跨管道两端土弹簧约束较弱,若土体性质发生变化,则结构整体刚度会明显改变,促使悬跨管道的自振频率发生明显变化;当土体很硬时,悬跨管道结构的约束条件已经足够强,若土体性质发生变化,结构固有频率的变化就没有前者明显.

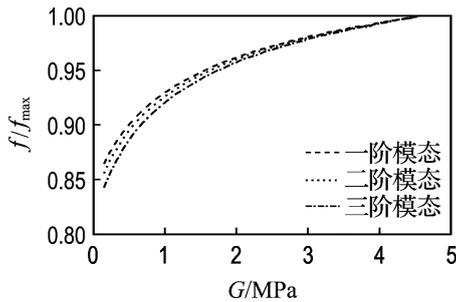


图4 悬跨管道的归一化频率随土体性质变化

Fig. 4 Normalized frequencies of free span pipeline in terms of clay performance variation

上述结论表明:边界土体性质变化对管道固有频率的影响不可忽略,因此,在海底悬跨管道振动分析时应根据实际海底环境土壤情况,确定边界土弹簧系数,然后建立考虑边界土体性质的结构分析模型.

2.2 环境荷载对固有频率的影响

管道在服役期间,波浪、海流是最常见的环境荷载.当水流横向流过管道时,由于尾流效应将出现涡激振动和波激振动,由此产生的疲劳破坏或因“频率锁定”而引起的失稳破坏是管道失效的主要方式.所以,环境荷载是管道设计所需考虑的主要荷载因素之一.这里引入约化速度 v_r 作为确定涡激振动发生的水流速度范围,表示为

$$v_r = \frac{U_c + U_w}{f_n D} \quad (5)$$

式中: U_c 、 U_w 分别为垂直于管道轴向上的平均海流速度和有效的波激流速; f_n 为管道给定模态的固

有频率(静水值).

已有研究表明:当 v_r 小于 3.5,来流方向(in-line)的涡激振动占优,随着 v_r 的增大,垂直来流方向(cross-flow)的涡激振动占优,当 v_r 接近 5.0 时将发生“频率锁定”现象^[6].文献[11]根据大量的试验结果,给出了仅考虑 cross-flow 方向响应频率占优的附加质量系数模型(见文献[11]中图 4~7).从图中可以看出:悬跨管道在涡激振动过程中的附加质量系数明显不同于静水中,其系数大小与约化速度 v_r 有关.由式(5)可知,对于跨长、管径恒定的悬跨管道, v_r 主要与垂直管径的水流速度 U (等于 $U_c + U_w$)有关,可见水流速度的变化将会引起附加质量系数的变化.

假设管道轴向力为 0,跨长 $L = 90D$,两端边界为软黏土, $S_u/I_p = 4$ kPa.结合我国渤海埕北油田基本环境数据,取海底流速的变化范围为 0~1.0 m/s.根据文献[11]中给出的附加质量模型,由本文考虑土体性质的计算模型求得管道固有频率如图 5、6 所示.

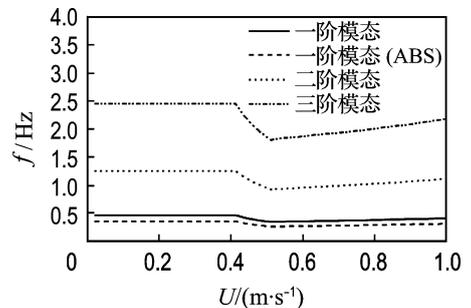


图5 悬跨管道固有频率随水流速度的变化

Fig. 5 Natural frequencies of free span pipeline in terms of flow velocity variation

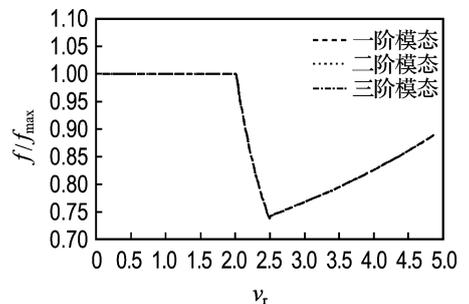


图6 悬跨管道归一化频率随水流速度的变化

Fig. 6 Normalized frequencies of free span pipeline in terms of flow velocity variation

从图5中可以看出:水流速度 $U \leq 0.4 \text{ m/s}$, 前3阶固有频率基本保持不变,此时对应的约化速度 $v_r = 2.0$;随着 U 的增大,管道固有频率快速降低,当 $U = 0.5 \text{ m/s}$ ($v_r = 2.5$) 时,前3阶固有频率都出现最小值.此后,随着 U 的增大,固有频率又逐渐增大.出现上述现象的原因在于海底流速变化对附加质量系数的影响.根据文献[11]可得,当约化速度 $v_r \leq 2.0$ 时(对应流速 $U \leq 0.4 \text{ m/s}$),附加质量系数 $C_a \leq 1.0$,一般在计算中取恒定值 $C_a = 1.0$.所以在图5中,当 $U \leq 0.4 \text{ m/s}$ 时结构固有频率保持不变.当 $v_r \geq 2.0$ 且逐渐增大过程中,对应的附加质量系数 C_a 先增大后减小,当 $v_r = 2.5$ 时, C_a 取最大值,此时对应流速 $U = 0.5 \text{ m/s}$.附加质量系数的增大,导致悬跨管道结构固有频率降低,所以从图5可以看到固有频率先减小后增大.图5中给出了使用ABS^[14]方法计算得到的铰支条件悬跨管道频率随水流速度变化值,可见不考虑边界土体弹性与考虑土体弹性存在较大区别.

图6给出了管道归一化频率随水流速度 U 的变化.可以看出:管道前3阶固有频率对水流速度变化的影响程度近似相同,代表不同模态的3条曲线基本重合.水流速度 U 从 0.4 m/s 变化到 0.5 m/s ,约化速度 v_r 则由 2.0 过渡到 2.5 ,各阶固有频率都降低了约 26.4% ,此阶段固有频率受影响程度较大; U 从 0.5 m/s 升高到 1.0 m/s ,对应 v_r 由 2.5 变化到 5.0 ,此阶段各阶固有频率相对升高了 15.5% ,固有频率受影响程度相对较小.通过上述分析可见:在进行悬跨管道特征分析(模态分析)时,应考虑海底流速对固有频率的影响,通过附加质量系数修正管道在静水中的频率以获得真实的横向响应频率.

2.3 轴向力对固有频率的影响

海底管道一般都采用铺管船进行铺设,在铺设过程中,管道不可避免地留有残余应力.在运行过程中,由于工作压力、温度的存在,管道也会出现轴向应力,另外,管道的停输温降和再启动都会使管道产生轴向应力,因此,轴向力的变化对管道固有频率的影响也是不可忽略的.

在该工况下,假设管道外部环境荷载恒定,设管道外部水流方向垂直管道轴线,速度为常数取 0.2 m/s ,两端边界为软黏土, $S_u/I_p = 4 \text{ kPa}$,跨长 $L = 90D$.引入量纲一的轴向力因子 F_{al} 表示轴向力的变化, $F_{al} = N/(W_s \times L)$, N 、 W_s 分别为轴向力、管道单位长度水下重度.由本文模型获得的管道固有频率如图7、8所示.管道受轴向拉力时 F_{al} 为正,反之为负.

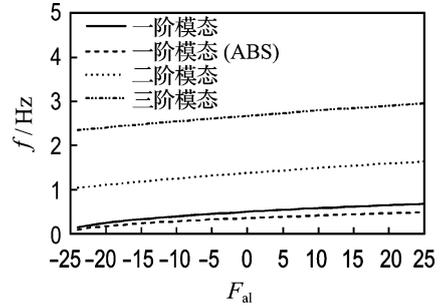


图7 悬跨管道的固有频率随轴向力变化
Fig. 7 Natural frequencies of free span pipeline in terms of axial force variation

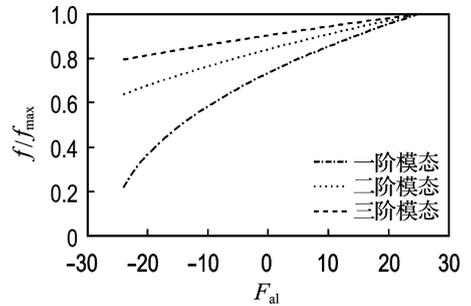


图8 悬跨管道的归一化频率随轴向力变化
Fig. 8 Normalized frequencies of free span pipeline in terms of axial force variation

从图7中可以看出:轴向力对固有频率影响明显,拉力越大,频率越高,反之压力越大频率越低,考虑和不考虑边界土层弹性对固有频率变化规律影响明显.由图8可见:一阶、二阶、三阶固有频率随轴向力变化的增大速率明显不同,轴向力变化对一阶固有频率影响程度远远大于其他阶次,随着频率阶次的升高这种影响程度逐渐减弱.

2.4 跨长对固有频率的影响

铺设海底的输液管道,由于海流冲刷、淘蚀作用以及海床的崎岖不平,不可避免地出现悬跨段.

在管道运行期间,悬跨管道的跨长是变化的,管道的跨长是决定动力响应的关键因素.假设管道外部环境荷载恒定,水质点速度取为 0.2 m/s ; 两端边界为软黏土, $S_u/I_p=4 \text{ kPa}$, 轴向力取为 0.

当跨长与管径的比值 $L/D < 30$ 时,管道固有频率远离涡激发放频率,振动幅值很小,不可能出现涡激振动,在管道设计中也无需进行疲劳校核^[11]. 本节主要针对 $30 < L/D < 100$ (管道运行状态下的典型跨长) 时的振动特性进行分析.

图 9、10 给出了跨长变化下管道的固有频率和归一化频率. 从图 9 可见,跨长变化对前 3 阶固有频率影响十分明显,跨长越小,固有频率受跨长影响程度越大; 随着跨长的增大,各阶固有频率将迅速减小,但减小的速率越来越小,最后趋于平缓. 在跨长较小时,考虑与不考虑边界土层弹性得到的固有频率差别较大,随着跨长的继续增大,这种趋势逐渐减弱. 由图 10 可见, L/D 由 30 增大到 100, 一阶、二阶、三阶固有频率变化率相差

大,分别为 87.4%、86.9%、86.0%,这说明跨长变化对管道各阶频率影响程度差别不大.

3 结 论

(1) 本文建立的模型能够很好地反映土体性质变化对悬跨管道固有频率的影响. 与 ABS 方法求解悬跨管道频率相比,本文数值模型更加合理,计算结果也更加接近实际. 边界土体性质对管道固有频率影响明显,且对于不同阶次的频率,影响程度是不同的,固有频率阶次越高,影响越大.

(2) 环境荷载对管道固有频率影响也比较大. 当水流速度较低时,固有频率基本不变,随着海底流速的增大,管道的固有频率先减小后增大. 且对于不同阶次的频率,影响程度几乎相同.

(3) 轴向力对管道固有频率的影响不可忽略. 轴向拉力越大,频率越高,反之压力越大频率越低. 轴向力对一阶固有频率影响程度远远大于其他阶次,随着频率阶次的升高影响程度逐渐减弱.

(4) 跨长变化对悬跨管道固有频率影响显著. 随着跨长的增大,管道各阶固有频率将迅速减小,后段趋于平缓. 对于跨长的变化,管道各阶固有频率变化速率趋势比较接近.

参 考 文 献:

- [1] SARPKEYA T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations [J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2004, **19**(4): 389-447
- [2] 余建星,俞永清,李红涛,等. 海底管跨涡激振动疲劳可靠性研究[J]. **船舶力学**, 2005, **9**(2): 109-115
- [3] XU T, LAURIDSEN B, BAI Y. Wave-induced fatigue of multi-span pipelines [J]. **Marine Structures**, 1999, **12**(2): 83-103
- [4] FURNES G K, BERNTSEN J. On the response of a free span pipeline subjected to ocean currents [J]. **Ocean Engineering**, 2003, **30**(12): 1553-1577
- [5] LARSEN C M, KOUSHAN K, PASSANO E. Frequency and time domain analysis of vortex induced vibrations for free span pipelines [C] // **Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Oslo: ASME,

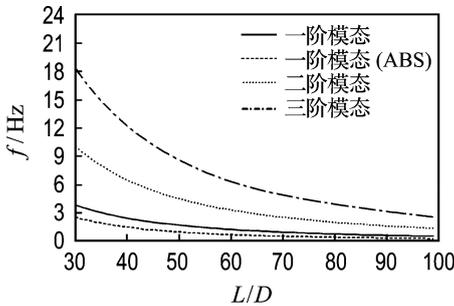


图 9 悬跨管道的固有频率随跨长变化

Fig. 9 Natural frequencies of free span pipeline in terms of span length variation

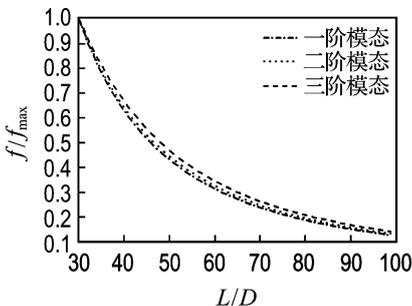


图 10 悬跨管道的归一化频率随跨长变化

Fig. 10 Normalized frequencies of free span pipeline in terms of span length variation

- 2002
- [6] CHOI H S. Free spanning analysis of offshore pipelines [J]. **Ocean Engineering**, 2001, **28**(10): 1325-1338
- [7] 罗延生,余建星,方华灿. 确定海底管线管跨段模糊固有频率的方法[J]. 天津大学学报, 2001, **34**(6): 775-778
- [8] 王树青,郭海燕. 水下输液管道动力特性研究[J]. 中国海洋大学学报, 2002, **32**(1):127-132
- [9] 娄敏,郭海燕,杨新华,等. 输液管道内流、轴向力和压强对允许悬跨长度的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2006, **36**(2):341-344
- [10] ANDERSEN K H. Cyclic clay data for foundation design of structures subjected to wave loading [C]// **Proceedings of the International Conference on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena, CBS04, Bochum, Germany, 31 March — 2 April 2004**. London: CRC Press, 2004
- [11] Det Norske Veritas. DNV Recommend Practice, DNV-RP-F105 Free Spanning Pipeline [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2006
- [12] 郎杰. SY/T10037—2002 海底管道系统规范[S]. 北京:石油工业出版社, 2002
- [13] Det Norske Veritas. Offshore Standard, DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems [S]. Norway: Det Norske Veritas, 2000
- [14] American Bureau of Shipping. Guide for Building and Classing Subsea Pipeline System [S]. Houston: American Bureau of Shipping, 2006
- [15] American Petroleum Institute. API SPEC5L Specification for Line Pipe [S]. Washington D C: American Petroleum Institute, 2000
- [16] 郑志昌,陈俊仁,朱照宇. 南海海底土体物理力学特征及其地质环境初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, **31**(4): 50-54

Analysis of vibration characteristics of free span pipeline considering boundary soil property

HU Jia-shun*, FENG Xin, ZHOU Jing

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 110624, China)

Abstract: Submarine pipelines are regarded as the lifeline of sub-sea oil and gas transmission, and natural frequency of free span is a key factor for evaluating its dynamic response condition. Soil property which is used to establish analytical model of free span pipeline can be simulated by means of altering dynamic stiffness of soil spring. Based on the proposed model, the fundamental vibration characteristics are studied. The effects of various factors, such as soil property, external environmental load, axial force and span length on natural frequencies are discussed in detail. The results show that span length has the largest effect on natural frequencies and the frequencies have different features corresponding to different factors.

Key words: free span pipeline; soil property; environmental load; axial force; span length