

基于 ANSYS 的近底床悬跨海管建模技术研究¹⁾

曹玉龙 林 缅²⁾

(中国科学院力学研究所环境力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 以 ANSYS 软件为平台建立了近底床钢管-混凝土单层悬跨海管有限元模型. 该模型综合应用 PIPE59, MATRIX27 和 COMBIN40 三个单元不仅模拟了海流对管道的作用, 而且还模拟了管内流体流动引起的科氏力和离心力, 另外还考虑了海管与底床的弹性接触. 通过与 CAM 和 DNV 工程规范对比, 验证了该模型. 研究表明, 所提出的建模方法可方便地应用于含内流的近底床悬跨海管的计算.

关键词 近底床, 悬跨海管, ANSYS 软件, 建模技术

中图分类号: P756.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2010)06-064-05

MODELLING OF A NEAR SEABED SPANNING PIPELINE BASED ON ANSYS¹⁾

CAO Yulong LIN Mian²⁾

(Laboratory of Environment Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract A finite element model is built by ANSYS software for the spanning pipeline composed of steel pipe and concrete layer. The elements of PIPE59, MATRIX27 and COMBIN40 are jointly used to simulate not only the forces that are acted by the external current but also those due to the internal flowing, such as the Coriolis force and centrifugal force. The elastic contact between the pipeline and sea bed is considered in the model. The model is verified by comparing with CAM and DNV engineering codes. The results show that the method can be applied to calculate the near-bed spanning pipeline with inner flows.

Key words near-bed, spanning pipeline, ANSYS software, modelling

悬跨是油气输运管道不可避免的一种状态, 它直接威胁到油气的安全输运. 因此, 工程师们希望通过商业软件 ANSYS 模拟悬跨海管的响应. ANSYS 是第一个通过 ISO9001 质量认证的有限元分析软件, 也是美国机械工程师协会 (ASME) 推荐的海洋工程结构设计软件^[1].

工程上通常用 ANSYS 中的浸入性单元 PIPE59 模拟海管, 其特点是简单易行, 海管的基本物理参量, 如, 海管密度、内流密度、外流密度、附加质量系数、海管截面尺寸、结构刚度、结构阻尼、升(阻)力系数等都可以在 PIPE59 单元中很方便地添加.

然而在工程现场悬跨海管并不是平直的, 而是存在弯曲变形. 管内流体在弯曲海管中流动将产生离心力. 加以以海管的振动, 管中流动还会产生科氏力. 如果将海管用 ANSYS 中的实体单元建模, 虽能考虑离心力和科氏力的影响, 但这将涉及到海管与其内部流体的耦合问题, 其模型建立起来相当复杂, 不适于工程应用. 陈雷^[2]用 ANSYS 建立海管模型, 借助 MATLAB 软件模拟了科氏力和离心力的影响, 而后调用 MATLAB 程序, 将科氏力和离心力添加到海管模型中. 由于该方法在软件间相互调用, 必然降低软件的效率和通用性. 还有研究人员通过自己编

2009-07-07 收到第 1 稿, 2010-07-14 收到修改稿.

1) 国家科技部“863”目标导向类项目(2006AA09Z301), 国家自然科学基金项目(40776057)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-212-2)资助.

2) 林缅, 研究员, 主要研究方向为水动力学、海洋环境与工程. E-mail: linmian@imech.ac.cn

程模拟内流的影响 [3-5]。

海管距底床较近，有可能与底床接触，这种接触的影响应当在模型中给予考虑。但研究人员在自编程序研究悬跨海管未对其进行讨论 [6-9]。乔惠芹 [10] 在 ANSYS 建模中考虑接触的影响，但在其模型中二者的接触是刚性的，与海床对海管的弹性接触不一致。

本文在 ANSYS 工程软件中建立了近底床悬跨海管模型，在该模型中考虑了内流的影响，同时考虑了底床对海管的弹性接触。

1 海管悬跨模型

1.1 模型描述

流速为 U 的均匀流作用于悬跨海管，如图 1(a) 所示，来流与海管垂直，海管两端受到弹性扭转约束。海管为钢管-混凝土结构，混凝土附着于钢管外壁，如图 1(b) 所示。

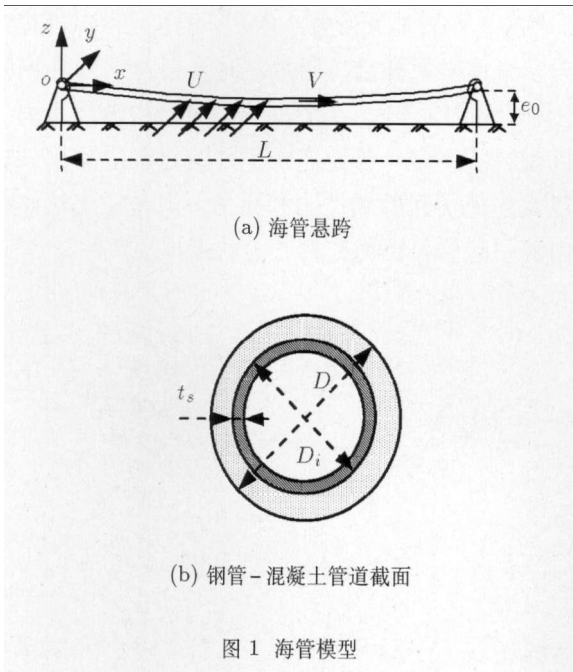


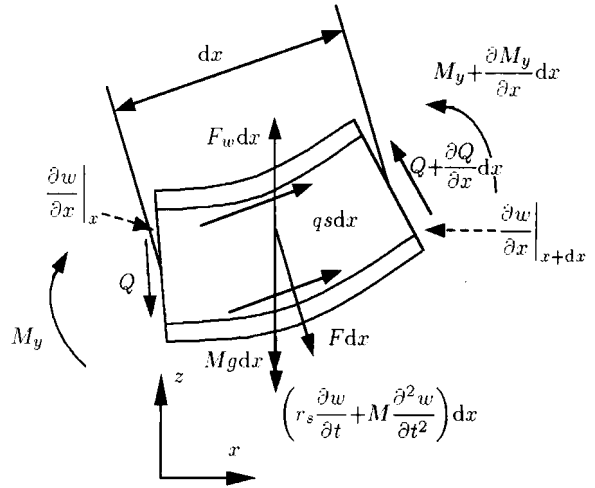
图 1 海管模型

1.2 建立模型

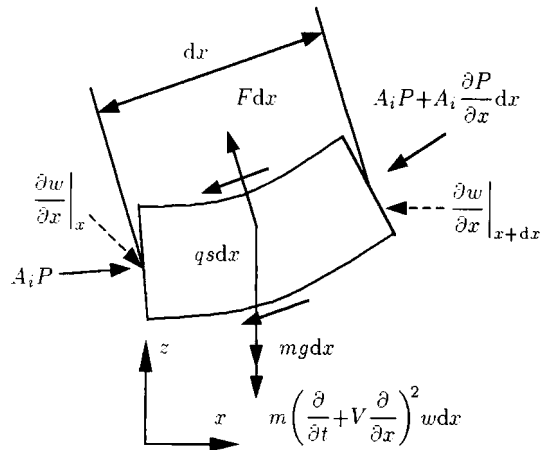
从海管中任意截取一个微段，其受力如图 2 所示。

z 方向振动方程为

$$F_w dx + \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) \cos \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+dx} + q_s dx \sin \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+\frac{1}{2}dx} = Q \cos \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_x + \left(r_s \frac{\partial w}{\partial t} + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) dx + F dx \cos \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+\frac{1}{2}dx} + Mg dx \quad (1)$$



(a) 管壁微元受力图



(b) 管内流体微元受力

图 2 海管微元受力

其中， $Q = -EI \partial^3 w / \partial x^3$ 管道微元横向剪切力， EI 为抗弯刚度； w 为海管在 z 方向位移； M 为单位长度海管质量； g 为重力加速度； r_s 为结构阻尼； F 为管内流体垂直作用于海管内壁上压力； $q_s dx$ 为平行于管壁的摩擦阻力； F_w 为外流作用在单位长度管道上横向力，包括升力、浮力、横向运动时的流体阻力和附加惯性力，即

$$F_w = F_L + \rho g A - r_f \frac{\partial w}{\partial t} - m_a \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2)$$

其中， $F_L = \rho C_L D U^2 / 2$ 为单位长度海管所受到的升力，这里 C_L 为升力系数， ρ 为海水密度， D 为海管外径， U 为来流速度； $A = \pi D^2 / 4$ 为单位长度海管排水面积； $r_f = \rho C_D D U / 2$ 为流体阻尼， C_D 为阻力系数； m_a 为附加质量。本文将海管结构阻尼 r_s 考虑为 Rayleigh 阻尼的形式 [11]，即

$$[r_s] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (3)$$

这里 α 为质量系数, β 为刚度系数, 它们与海管一阶固有角频率 ω_1 和二阶固有角频率 ω_2 的关系为

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\zeta}{\omega_1 + \omega_2}, \quad \beta = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2} \quad (4)$$

ζ 为结构阻尼比. DNV 规范^[12]中建议取 $\zeta = 0.005$.

两侧剪力在 z 向投影之差

$$\left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx\right) \cos \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+dx} - Q \cos \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_x = \frac{\partial Q}{\partial x} dx \quad (5)$$

将式(5)代入式(1), 整理后得

$$F_w + \frac{\partial Q}{\partial x} - r_s \frac{\partial z}{\partial t} - M \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - F - Mg = 0 \quad (6)$$

由图 2(b) 建立流体微元在 z 向的振动方程

$$\begin{aligned} F dx \cos \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+\frac{1}{2}dx} + PA_i \sin \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_x = \\ q_s dx \sin \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+\frac{1}{2}dx} + \\ \left(A_i P + A_i \frac{\partial P}{\partial x} dx\right) \sin \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+dx} + \\ m \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x}\right)^2 w dx + mg dx \end{aligned} \quad (7)$$

这里 A_i 为海管内截面面积管壁微元; P 为内流压强; m 为单位长度管内流体质量; V 为内流速度.

将管内流体惯性项展开

$$m \left(\frac{\partial}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x}\right)^2 w = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2mV \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} + mV^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (8)$$

其中, $m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$ 是内流的惯性力; $2mV \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x}$ 是内流的科氏力; $mV^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ 是内流的离心力.

由于 $\sin \frac{\partial w}{\partial x} \approx \frac{\partial w}{\partial x} \approx 0$, 所以微元两侧压强在 z 向投影之差为

$$\begin{aligned} PA_i \sin \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_x - \left(A_i P + A_i \frac{\partial P}{\partial x} dx\right) \sin \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+dx} = \\ -PA_i \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dx \end{aligned} \quad (9)$$

鉴于 $\frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x+\frac{1}{2}dx} \approx 0$, 将式(7)整理得

$$F_w + \frac{\partial Q}{\partial x} - r_s \frac{\partial z}{\partial t} - M \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - F - Mg = 0 \quad (10)$$

考虑到剪切力与位移的关系, 联立式(6)、式(10)可得近底床悬跨海管的振动方程

$$\begin{aligned} (M + m + m_a) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + (r_s + r_f) \frac{\partial w}{\partial t} + 2mV \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + \\ (mV^2 + PA_i) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \\ F_L + \rho Ag - mg - Mg \end{aligned} \quad (11)$$

方程中 $(M + m + m_a) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$ 表示含内流海管的惯性力; $(r_s + r_f) \frac{\partial w}{\partial t}$ 表示含海管受到的阻尼力; $2mV \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t}$ 表示内流引起的科氏力; $(mV^2 + PA_i) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ 表示内流引起的离心力; $EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}$ 是海管自身的弹性力.

1.3 ANSYS 处理模型

为实现在 ANSYS 中模拟海管响应, 本文选用 PIPE59 单元模拟海管(如图 3 所示). PIPE59 单元是一种浸入性单元, 它是三维空间的两节点梁单元. 该单元可以模拟外部流体载荷作用下 Euler-Bernoulli 梁的响应. 针对本文模型, PIPE59 单元可以模拟惯性力、流体阻尼和结构阻尼、海管自身的弹性恢复力、海管升力、浮力、海管重力以及管内流体重力. 可以说, PIPE59 单元完成了外流对管道作用的模拟以及内流引起的惯性力和重力, 但是还无法实现对内流引起的科氏力和离心力的模拟.

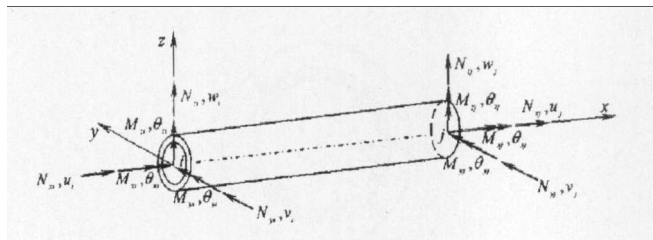


图 3 梁模型的受力与变形

其实在 ANSYS 中有一个不常用的底层单元——MATRIX27 单元能够模拟内流的作用. 与其他单元不同的是, 该单元具有任意性. MATRIX27 单元没有具体的形状(如图 4 所示). 该单元通过直接改变模型方程来实现其他单元难以模拟的外力作用. 据此, 本文用 ANSYS 中的 MATRIX27 单元模拟内流科氏力和离心力对海管的影响. MATRIX27 单元以质量矩阵、阻尼矩阵或者刚度矩阵的形式添加到模型方程中^[13]. 在处理离心力项时, 先对海管微元建立一个表示刚度的 MATRIX27 单元, 而后对 MATRIX27 单元的两个节点共同的刚度矩阵赋予离心力矩阵的对应值. 这样就在 ANSYS 中添加了离心力的作用.

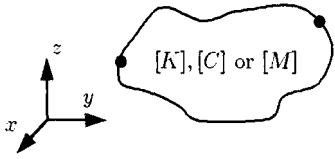
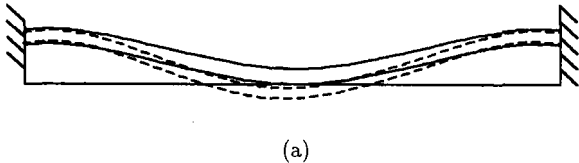
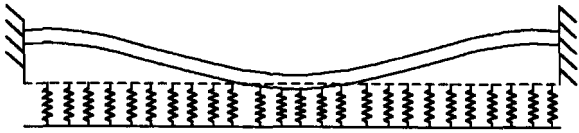


图 4 MATRIX27 单元示意图

当海管与底床接触时，底床对海管有支持作用。如在模型中不考虑该支撑，那么在求解过程中就可能出现海管大面积侵入底床的情况(图 5(a))。如果部分海管位移侵入底床，则该部分间隙比 $e/D < 0$ (e 为海管与底床的间距)，超出了海管升力系数公式的合理范围。这时沿用该公式则会使得下一迭代步海管位移不合理，并最终导致海管平衡位移不合理。所以海管数值模型也应当能够体现底床对于海管的状态非线性支撑作用。本文模型用一系列 COMBIN40 单元模拟底床对海管的支撑作用(图 5(b))，将海管位移限制在合理的范围内。



(a)



(b)

图 5 底床对海管的支撑

与 PIPE59 类似，COMBIN40 单元也是两节点三维空间单元(如图 6 所示)，它可以模拟空间六个自由度中任意一个自由度的弹性力。并且 COMBIN40 单元还可以通过打开自身的 Gap 开关来模拟状态非线性接触。在这里状态非线性接触是指海管与底床时而接触时而不接触的状态变化。当海管与底床接触时，底床对海管具有弹性支撑作用；当海管与底床不接触时，这种支撑作用就不存在。

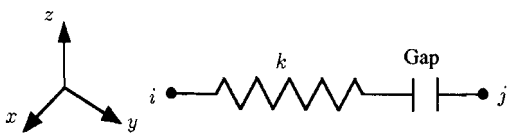


图 6 COMBIN40 单元示意图

这样就完成了用 ANSYS 工程软件建立海管模型。细节请参考文献 [14]。

2 模型验证

为考虑恒定载荷对海管的作用，本文与工程上常用于计算海管安全跨长的 CAM 方法进行比较。由美国矿产管理局 (MMS)^[15] 推荐的 CAM 方法从强度失效角度考虑海管在恒定载荷状态下的安全跨长，该方法未考虑水动力和跨端约束的影响。本文所建 ANSYS 海管模型与 CAM 方法在参数如表 1 条件下进行对比。

表 1 静态验证参数表

配重层外径	钢管外径	钢管壁厚	钢的弹性模量
D/m	D_i/m	t_s/m	E/MPa
1	0.8	0.012	2.11×10^5
钢的密度	混凝土密度	重力加速度	钢的容许应力
$\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	$\rho_c/(kg \cdot m^{-3})$	$g/(m \cdot s^{-2})$	$[\sigma_s]/MPa$
7800	2400	9.8	2.5×10^2

对比结果如图 7 所示。图 7 表示海管临界安全跨长随钢管壁厚的变化。可以看出，ANSYS 模型与 CAM 方法所得结果吻合，可认为本文模型正确。

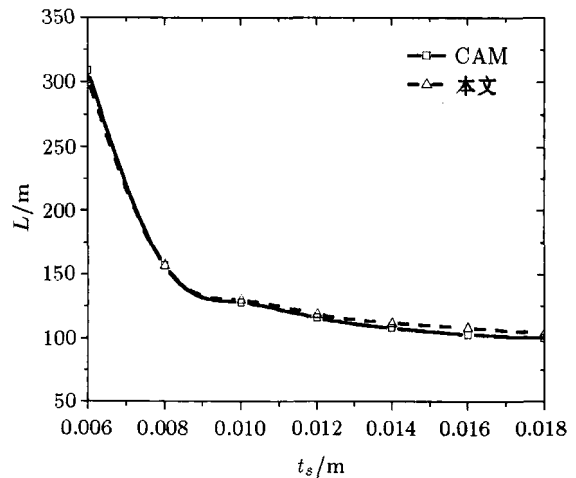


图 7 海管临界安全跨长随钢管壁厚的变化

为了进一步验证本模型预测安全跨长的准确性，与 DNV 规范^[16] 做对比。该模型模拟了在海水中两端固支的单层钢管发生锁频现象时的安全跨长。模型参数如表 2 所示，一般将 C_a 考虑为常数，对比结果如图 8 所示。

本文模型与 DNV 规范结果较为接近，鉴于上面两组验证的结果，可认为本模型正确。

表2 安全跨长验证参数表

内径	外径	约化速度	钢的弹性模量	钢的密度
D_i/m	D/m	V_r	E/MPa	$\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$
0.292	0.324	5	2.11×10^5	8 200
内流速度	内流密度	内流压强	附加质量系数	海水密度
V	$\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$	P	C_a	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
0	908.2	0	1	1 000

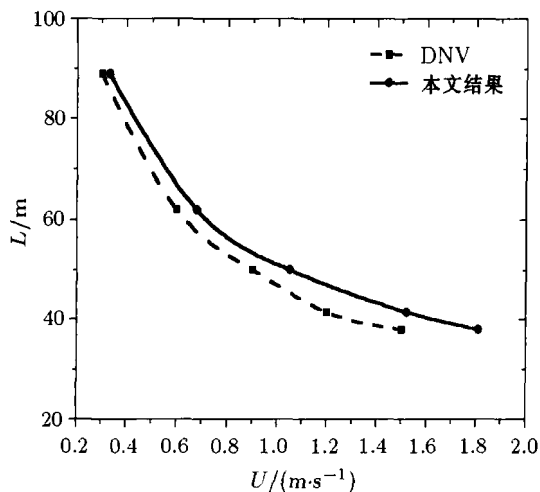


图8 动态临界安全跨长随流速的变化

3 结论

通过综合运用 ANSYS 中 PIPE59、MATRIX27 和 COMBIN40 三个单元,建立了含内流的近底床海管模型,并验证了该模型的正确性,可用于计算近底床悬跨海管的相关问题。

参考文献

- 1 谭建国. 使用 ANSYS 6.0 进行有限元分析. 北京: 北京大学出版社, 2002
- 2 陈雷. 海洋输液管道的涡激振动响应分析及实验研究. 中国海洋大学, 2006
- 3 Lou M, Ding J, Guo HY. Effect of internal flow on vortex-induced vibration of submarine free spanning pipelines. *China Ocean Engineering*, 2005, 19(1): 147-154
- 4 Fu Q, Guo HY, Yang XH. Analysis of dynamic characteristics of submarine free spanning pipelines by complex

damping method. *China Ocean Engineering*, 2004, 18(3): 483-491

- 5 李磊岩, 李华军, 梁丙臣等. 海底管道管跨段在内外流体作用下的竖向动力特性研究. 中国海洋大学学报, 2005, 35(1): 162-166 (Li Leiyan, Li Hua jun, Liang Bingchen, et al. Study on the cross-flow dynamic characteristics of a submarine free span pipeline subjected to internal and external flow. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(1): 162-166 (in Chinese))
- 6 杨新华, 郭海燕, 娄敏等. 考虑阻尼海底悬跨管道的动力特性及允许悬空长度. 海洋工程, 2005, 23(1): 1-5 (Yang Xinhua, Guo Haiyan, Lou Min, et al. Allowable span length of submarine pipeline considering damping. *Ocean Engineering*, 2005, 23(1): 1-5 (in Chinese))
- 7 娄敏, 郭海燕, 杨新华. 海底输液管道内流、轴向力和压强对允许悬空长度的影响. 中国海洋大学学报, 2006, 36(2): 341-344 (Lou Min, Guo Haiyan, Yang Xinhua. The effects of internal flow, axial force and pressure on the allowable span length of submarine pipelines. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(2): 341-344 (in Chinese))
- 8 王树青, 郭海燕. 水下输液管道动力特性研究. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(1): 127-132 (Wang Shuqing, Guo Haiyan. Study on dynamic characteristics of a subsea pipe conveying flowing fluid. *Periodical of Ocean University of China*, 2002, 32(1): 127-132 (in Chinese))
- 9 赵雪健, 王茂廷, 王莲. 内外流作用下海底悬跨管线的动力特性分析. 特种设备安全技术, 2007, 23(1): 37-39 (Zhao Xuejian, Wang Maoting, Wang Lian. Dynamic characteristics of a subsea spanning pipeline conveying flowing fluid. *Special Equipment*, 2007, 23(1): 37-39 (in Chinese))
- 10 乔惠芹, 丁果林, 杨树耕. 采用 ANSYS 5.7 的海底管线起吊过程非线性有限元静力分析. 中国造船, 2002, 43: 310-313 (Qiao Huiqin, Ding Guolin, Yang Shugeng. Nonlinear static finite-element analysis of offshore pipeline under suspending by ANSYS5.7. *Shipbuilding of China*, 2002, 43: 310-313 (in Chinese))
- 11 胡海岩, 孙久厚, 陈怀海. 机械振动与冲击. 北京: 航空工业出版社, 1998
- 12 Det Norske Veritas: Free Spanning Pipelines. 2006
- 13 ANSYS Inc. ANSYS Release 9.0 Documentation. 2004
- 14 曹玉龙. 近底床悬跨海管安全跨长的预测. 中国科学院, 2009
- 15 United States Department of the Interior Minerals Management Service: Assessment and Analysis of Unsupported Subsea Pipeline Spans. 1997
- 16 Det Norske Veritas: Rules for Submarine Pipeline Systems. 1981

(责任编辑: 刘俊丽)