DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.012
付长静, 李国英, 赵天龙. 孤立波作用下海底管道允许悬跨长度简化计算[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 83-88. (FU Changjing, LI Guoying, ZHAO Tianlong. Simplified calculation of allowable free span length of submarine pipelines under action of solitary waves[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(4): 83-88. (in Chinese))

孤立波作用下海底管道允许悬跨长度简化计算

付长静[1,2], 李国英[2], 赵天龙[1]
(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 南京水利科学研究院 江苏 南京 210029)

摘要: 分析海底管道稳定性时,需要重点考虑管道发生悬空的情况。由于我国油田大多建设在近海地区,因此在考虑管道悬空问题时需考虑浅水区波浪的特点。基于孤立波理论,考虑浅水区波浪的特点,给出浅水区管道悬空段所受的动水作用力。针对常见的悬空形式,从管道最大静弯曲应力不超过材料许用应力的角度出发,推导出浅水区管道允许悬空长度的计算式。最后结合渤海湾某油田海底管道工程,计算出该海区管道的允许悬跨长度,认为该海区有部分管道已超过计算的允许悬跨长度,应进行加固处理。

关 键 词: 非线性波浪原理; 海底管道; 波浪力; 悬空长度
中图分类号: P756.2; TV139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2017)04-0083-06

由于现场条件和施工要求不同,海底管道的铺设方法略有不同,包括直接铺置和埋置(含深埋和浅埋)。但因海床表面凹凸不平,海床土的液化和坍塌及管道附近水动力等因素,无论采取何种铺设方法,海底管道都可能出现局部悬空现象。由于非设计悬空而发生的管道事故,国内外有许多案例,如墨西哥湾的海底管道事故[1],以及我国埕岛油田管道泄漏事故[2],因此在分析海底管道稳定性时,需要重点考虑管道发生悬空的情况。目前对于管道的悬跨长度计算大致有 3 种方法,即弯矩修正法[3]、涡激振动法[4-5]和线性累积损伤法[6],但上述方法大都考虑线性波作用。由于我国海上石油开采起步较晚,目前大多数油田都建在近海区,因此在管道建设及运行阶段需考虑浅水区波浪等环境影响。大量研究结果表明,在深水区采用线性波浪理论(波高 H 和波长 L 关系为 $H/L \to 0$)计算误差一般在允许范围内,但对于浅水区,会引起较大的误差[7]。因此研究浅水区管道的悬跨问题时,需充分考虑波浪的非线性影响,深入了解波浪在浅水区的运动特性。目前对非线性波的讨论大多集中在深水区(Stokes 波浪理论),根据 Le Mehaute[8] 的研究成果可知,当水深较浅(波长 L 与水深 d 关系为 $d/L<0.04$) 时,Stokes 波浪理论就已经不再适用,可以采用孤立波理论。

1 一阶近似孤立波理论

一般取幂级数作为势函数 ϕ,表达式[9]为:

$$\phi = \sum_{n=0}^{\infty} z^n \phi_n(x,t),\ \phi_1(x,t) = 0 \tag{1}$$

若假定在 x 无穷远处不存在波动,则自由水面 $z = \eta + d$ 处的边界条件为:

收稿日期: 2016-07-12
基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究专项项目(cstc2016jcyjA0551);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1600516);国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2016B07)
作者简介: 付长静(1987—), 女, 青海西宁人, 讲师, 博士, 主要从事岩土工程测试和数值模拟研究。
E-mail:nhri_fuchangjing@163.com

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\phi}{\partial t}+g\eta+\dfrac{1}{2}(v_x+v_z)=0\\ \left.\dfrac{\partial\phi}{\partial z}\right|_{z=\eta+d}=\left.\dfrac{\partial\eta}{\partial t}+\dfrac{\partial\eta}{\partial x}\dfrac{\partial\phi}{\partial x}\right|_{z=\eta+d}\end{cases}\tag{2}$$

式中：η 为波面在静水以上的高度；v_x，v_z 为流场内水质点的水平流速和竖向流速；d 为水深。

在研究浅水区波浪时，通常认为水质点的竖向分速远小于水平分速，因此忽略 v_z 的影响，并将 v_x 用线性化水平分速取代，则上述边界条件可转化为：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\phi}{\partial t}+g\eta+\dfrac{1}{2}\dfrac{g}{d}\eta^2=0\\ \dfrac{\partial\phi}{\partial z}=\dfrac{\partial\eta}{\partial t}+\sqrt{\dfrac{g}{d}}\eta\dfrac{\partial\phi}{\partial x}\end{cases}\tag{3}$$

根据上述条件，可得到自由水面非线性影响的二阶近似波动方程：

$$\frac{\partial^2\eta}{\partial t^2}=gd\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2}+gd\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{3}{2}\frac{\eta^2}{d}+\frac{d^2}{3}\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2}\right)\tag{4}$$

考虑到浅水区水质点的竖向分速很小，因此忽略 v_z 的影响，只需取一阶近似解：

$$\eta=H\operatorname{sech}^2\left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}}(x-t\sqrt{g(d+H)})\right]\tag{5}$$

式中：H 为波高，则势函数 ϕ 为：

$$\phi=\frac{2d}{\sqrt{3g}}\tanh\left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}}(x-t\sqrt{g(d+H)})\right]\tag{6}$$

根据式(6)可求得波浪场内任意一水质点的水平分速 v_x 为：

$$v_x=\frac{\partial\phi}{\partial x}=\sqrt{\frac{H}{d}}\operatorname{sech}^2\left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}}(x-t\sqrt{g(d+H)})\right]\tag{7}$$

2 波浪力计算

在求解管道允许长度时，需对管道进行受力分析。由于浅水区波浪对管道的影响较大，应充分考虑波浪作用下管道所受的动水作用力，也可以称为波浪力。图 1 为波浪力计算模型图，不考虑尾流效应影响，根据 Morision 方程[10]，裸置管道所受的水平力 F_H 和垂直力 F_V 分别为：

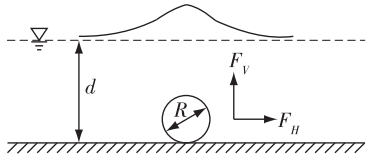


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

$$F_H=F_{HI}+F_D\tag{8}$$

$$F_V=F_{VI}+F_L\tag{9}$$

式中：$F_{HI}=\rho_w(\pi R^2/4)C_M\partial v_x/\partial t$ 为水平惯性力；ρ_w 为海水密度；R 为管道直径；C_M 为惯性力系数；$v_x=\partial\phi/\partial x$ 为水质点运动的水平分速；$\partial v_x/\partial t$ 为管线中心位置处波动水质点的水平加速度；$F_D=\rho_w RC_D v_x^2/2$ 为阻力，C_D 为阻力系数；$F_{VI}=\rho_w(\pi R^2/4)C_M\partial v_z/\partial t$ 为垂直惯性力，$v_z=\partial\phi/\partial z$ 为水质点运动的竖向分速；$F_L=\rho_w RC_L v_x^2/2$ 为阻力，C_L 为举力系数。

根据浅水区的线性假设，忽略 v_z，根据式(7)~(9)推导得出浅水区管道悬空段所受波浪力为：

$$\begin{aligned}F_H=F_{HI}+F_D=C_M\frac{\pi\rho_w HR^2}{4d^2}\sqrt{3g(d+H)}\tanh\left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}}(x-t\sqrt{g(d+H)})\right]\cdot\\ \operatorname{sech}^2\left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}}(x-t\sqrt{g(d+H)})\right]+C_D\frac{\rho_w RH}{2d}\operatorname{sech}^4\left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}}(x-t\sqrt{g(d+H)})\right]\end{aligned}\tag{10}$$

$$F_{\mathrm{V}} = F_{\mathrm{L}} = C_{\mathrm{L}} \frac{\rho_{\mathrm{w}} RH}{2d} \operatorname{sech}^4 \left[\sqrt{\frac{3H}{4d^3}} \left(x - t\sqrt{g(d+H)} \right) \right] \tag{11}$$

由式(10)和(11)可以看出，要计算管道所受的动水作用力，也可称作波浪力，必须知道 3 个参数，即惯性力系数 C_{M}、阻力系数 C_{D}以及举力系数 C_{L}的大小，本文根据文献[10]中提出的参数值进行选取。

3　海底管道允许悬空长度计算

3.1　悬空形式

管道无论是埋置在海床中，还是直铺在海床上，在波流冲刷下都有可能发生悬空，由于海床地形以及海域的环境条件不同，悬空形式也不同。通常浅水区管道受波浪的影响较大，管道铺设较多采用浅埋方式。在这种情况下，埋置管道经过波流的长期冲刷，部分管道会裸露在海床面，而后又在波流的进一步冲刷下发生悬空，管道悬空示意见图 2。

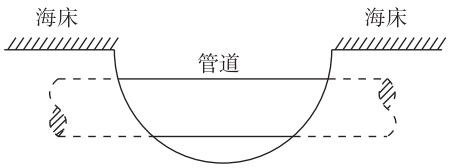


图 2　埋置管道常见悬空形式

Fig. 2　Common situation of suspended submarine pipelines

3.2　允许悬空长度计算

在自身重力(包括配重)和环境荷载作用下，管道的悬空段发生静力及动力响应，当管道周围海流速度较小时，可以考虑采用静力方法计算管道的悬空长度。利用静力法计算管道的允许悬空长度时，往往从管道最大静弯曲应力不超过材料许用应力的角度出发。将计算得到的弯曲应力与材料的许用应力进行比较，得到管道的允许悬空长度。

由于管道两端埋置在海床中，可认为管道两端固定，在计算时将单位长度管道上的动水作用力、水下管道单位长度的自重(包括相关配件及输送介质的重量)等外力进行矢量合成，并将该合力以分布荷载的形式作用到管道上，如图 3 所示。

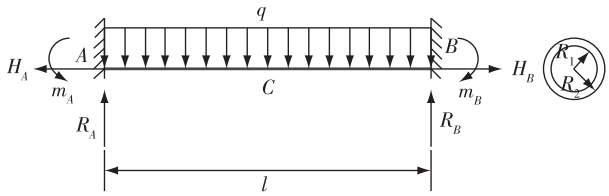


图 3　悬空管道受力分析示意

Fig. 3　Diagram of analysis of forces of suspended submarine pipelines

考虑管道发生悬空时，管道 C 点最易发生破坏，因此分析时主要计算该处的弯曲应力。但从图 3 可以看出，若要求 M_C，必须先计算出管道所受的 6 个未知反力(包括 $m_A, R_A, H_A, m_B, R_B, H_B$)，而有效的静力平衡方程只有 3 个，因此，该问题为 3 次超静定问题。然而，在小变形的情况下，可以认为沿管道线的水平位移很小，可以忽略不计，即可以忽略水平反力 H_A与 H_B。这样就去掉了 1 个有效的平衡方程，因此，在小变形情况下，有 4 个未知反力，将问题变为二次超静定问题。

在求解该二次超静定问题时，将两端限制转动的约束去掉，代之以相应的力偶 m_A, m_B，即将图 3 中给出的管道受力情况简化为图 4 所示。

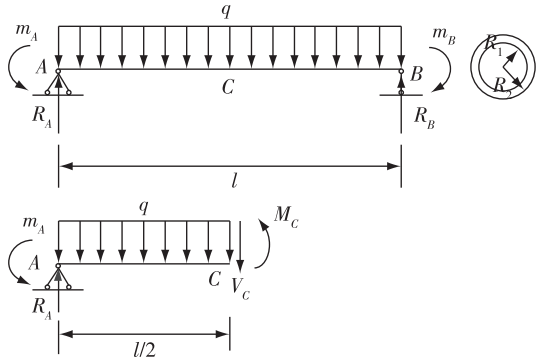


图 4　受力简化示意

Fig. 4　Diagram of simplified mechanical model

根据变形相容条件，可知 $\theta_A = 0$, $\theta_B = 0$，得到：

$$m_A = ql^2/12\ ,\ m_B = ql^2/12 \tag{12}$$

式中：l 为管跨长度；q 为集中荷载，由单位长度管道上的动水作用力 F_{H} 和 F_{V}，以及水下管道单位长度的重力 F_{P}(包括相关配件及输送介质的重量)等外力进行矢量合成，$q = \sqrt{F_{\mathrm{H}}^2 + (F_{\mathrm{V}} + F_{\mathrm{P}})^2}$。

根据平衡方程 $\sum M_A = 0$ 与 $\sum M_B = 0$，得：

$$R_A = ql/2\ ,\ R_B = ql/2 \tag{13}$$

式中：M_A ，M_B ，R_A ，R_B 分别为支点 A 和 B 点的弯矩和反力。

假想沿 C 截面将管切断，保留左端，按正方向假设出 C 截面上的剪力 V_C 和弯矩 M_C（见图 4）。根据平衡方程 $\sum Y = 0$ 与 $\sum M_C = 0$，得：

$$V_C = 0\ ,\ M_C = 7ql^2/24 \tag{14}$$

根据材料力学可知，管道 C 点横截面上的最大弯曲应力为：

$$\sigma_{\max} = M_C/W_z \tag{15}$$

式中：W_z 为抗弯截面系数，对于圆管 $W_z = 4\pi R_2^3(R_2^4 - R_1^4)$ ，R_1 为管道内半径，R_2 为管道外半径。

根据式(14)与(15)，得：$\sigma_{\max} = \dfrac{7ql^2}{96\pi R_2^3(R_2^4 - R_1^4)}$ (16)

在求解管道的允许悬空长度时，认为管道的最大弯曲应力 $\sigma_{\max}$ 应小于材料的许用应力 $[\sigma]$ ，即：

$$\sigma_{\max} \leqslant [\sigma] \tag{17}$$

根据式(16)与式(17)，给出允许悬空长度计算式：$l_{\max} = \sqrt{\dfrac{96\pi[\sigma]R_2^3(R_2^4 - R_1^4)}{7q}}$ (18)

根据孤立波理论，得到管道允许悬空长度为：$l_{\max} = \sqrt{\dfrac{96\pi[\sigma]R_2^3(R_2^4 - R_1^4)}{7[F_H^2 + (F_V + F_P)^2]^{1/2}}}$ (19)

4 工程实例

某油田位于渤海湾，目前年产原油近 100 万 t。自 2008 年 8 月首条海底管道埋设投产运行以来，工程海区海床普遍呈现整体冲刷态势，部分埋设管道已出现了裸露、悬空现象，其中 1-1#~1-3#人工岛之间的海底输油管道出现大面积吸沙区，且吸沙区内海底输油管道出现大范围悬空（见图 5），管道悬空状况见表 1。当管道悬空长度达到一定值时，管道较容易失稳，甚至发生重大安全事故，造成油田停产、生态环境破坏等严重后果，因此需要对悬空的海底管道进行定期维护和处理，但由于海上施工作业成本高，难度大，可以对处于悬空但在安全允许悬空范围内的管道暂不进行加固，以节省施工成本，因此需要计算管道的允许悬空长度。

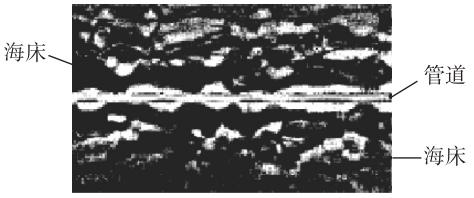


图 5 悬空管道现状

Fig. 5 Present situation of suspended pipelines

管道材料为 X65Q，密度为7 850 kg/m^3，弹性模量为 207 GPa。其中混输管道采用双管结构，外管直径 660 mm，内管直径 508 mm，供水管道直径 356 mm。根据 API 5I PSL2 标准可知 X65 钢管材料许用弯曲应力为 327 MPa。计算时采用的波浪要素为考虑冲刷最严重的情况，分别计算设计波浪 50 年、5 年、2 年重现期时海底管道允许悬空长度。波浪要素具体数值[12]为：水深 d 为 5 m，海水密度 ρ_w 为1 030 kg/m^3，50 年、5 年、2 年重现期的波长 L 分别为 80.0，70.3 和 65.2 m；周期 T 分别为 8.8，8.3 和 7.8 s，波高 H 分别为 4.69，3.94 和 3.67 m。

根据式(19)计算得混输管道 50 年、5 年和 2 年重现期的允许悬空长度分别为 35.42，35.31 和 35.27 m；供水管道相应的允许悬空长分别为 30.504，30.528 和 30.605 m。可见，计算得到混输管道允许悬空长度大约为 35 m；供水管道的允许悬空长度相对较小，允许悬空长度大约为 30 m。而从表 1 可以看出，目前混输管道有两段大于允许悬空长度，供水管道有一段大于允许悬空长度。这些管道存在严重的安全隐患，一旦结构损坏，必将造成极大的经济损失和生态破坏，应对这些管道进行及时处理。

表 1　管道悬空状况[11]

Tab. 1　Suspended conditions of subsea pipelines[11]

管道形式	悬空段的位置/m	悬空长度/m	悬空高度/m	水深范围/m
混输管道	1 779~1 823	44	0.65	3.7~4.2
	3 410~3 459	49	0.90	3.9~5.1
	3 471~3 489	18	0.78	3.5
	3 512~3 532	20	0.60	3.9~5.0
	2 590~3 604	14	0.56	4.4
注水管道	1 632~1 689	57	0.24	3.4~3.7
	2 600~2 616	16	0.30	2.2~2.9
	2 807~2 813	6	0.35	4.2
	2 894~2 899	5	0.23	2.7

5　结　语

根据浅水区波浪特点，基于一阶近似孤立波理论，利用 Morison 方程推导出浅水区海底管道悬空段所受波浪力的求解公式。针对常见的悬空形式，基于材料力学理论，从管道最大静弯曲应力不超过材料许用应力的角度出发，计算出管道的最大弯曲应力，并与材料的许用应力进行比较，进一步推导出浅水区管道允许悬空长度的计算式。最后，根据推导公式计算出渤海湾某油田海底管道的允许悬空长度。据相关资料可知，目前该海区有部分管道已超过计算的允许悬空长度，应对其进行加固处理，以免发生事故，造成不必要的经济损失和生态破坏。

参　考　文　献：

[1] 赫比希 J B. 海底管道设计原理[M]. 北京：石油工业出版社，1988.（HERBICH J B. Principle of submarine pipeline design [M]. Beijing：Petroleum Industry Press，1988.（in Chinese））

[2] 许文兵. 平湖油气田海底输油管线临时修复方法[J]. 中国海洋平台，2003，18(2)：37-40.（XU Wenbing. The temporary repairing method for sub-sea oil pipeline of Pinghu oil and gas field[J]. China Offshore Platform，2003，18(2)：37-40.（in Chinese））

[3] 王维. 确定海底埋设输油管线允限冲刷长度的一种实用方法[J]. 西南石油学院学报，1996，18(3)：94-97.（WANG Wei. A practical method of obtaining allowable erosion length of sea-bottom imbeded oil pipeline[J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute，1996，18(3)：94-97.（in Chinese））

[4] 马良. 海底管道在水流作用时诱发的振动效应[J]. 中国海洋平台，2000，15(2)：30-35.（MA Liang. The vibration effect of subsea pipelines under the effect of water[J]. China Offshore Platform，2000，15(2)：30-35.（in Chinese））

[5] FURNES G K，BEOTSEN J. On the response of a free span pipeline subjected to ocean currents[J]. Ocean Engineering，2003 (30)：1553-1557.

[6] DNV-OS-F101 Submarine pipeline systems[S].

[7] SUDHAN C M，SUNDAR V，RAO S N. Wave induced forces around buried pipeline[J]. Ocean Engineering，2002，29(5)：533-544.

[8] MÉHAUTÉB L. An introduction to hydrodynamics and water waves[M]. New York：Springer-Verlag，1976.

[9] 邱大洪. 波浪渗流力学[M]. 北京：国防工业出版社，2006.（QIU Dahong. Wave percolation mechanics[M]. Beijing：National Defence Industry Press，2006.（in Chinese））

[10] 范运林. 作用在海底管线上的波浪力[J]. 海洋科学，1983(6)：1-7.（FAN Yunlin. Wave forces on submerged pipelines near the sea-bottom[J]. Marine Science，1983(6)：1-7.（in Chinese））

[11] 李春雨. 南堡油田人工岛海底管线悬空分析及治理[J]. 内江科技，2012(1)：113-119.（LI Chunyu. The analysis and control of submarine pipeline of artificial island of South Fort Oilfield[J]. Neijiang Science and Technology，2012(1)：113-

119. (in Chinese))

[12] 河流海岸研究所. 冀东南堡油田 1#构造水域波浪数模推算报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014. (Institute of River and Coastal Research. The calculation report of wave mathematical model for 1# waters in Nanpu Oilfield[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))

Simplified calculation of allowable free span length of submarine pipelines under action of solitary waves

FU Changjing[1,2], LI Guoying[2], ZHAO Tianlong[1]

(1. *Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing* 210029, *China*)

Abstract: It is important to consider the suspension of the submarine pipelines, analyzing the stability of the submarine pipelines. Because of the complex geological conditions of the seabed, the buried pipelines hung on the seabed are affected by waves. Once occurred the suspension of the pipelines, the suspended pipelines would be destroyed under the action of the external environment. The pipelines accidents lead to a great loss of property and bring the pollution of the marine environment. Because most of the oil fields are located in the offshore areas in our country, the characteristics of shallow water waves should be considered. Based on the solitary wave theory, and considering the non-linear effects of the shallow water waves, the hydrodynamic loads on the suspension of the pipelines was calculated in this study. For the common forms of hanging pipelines, considering that the max bending stresses are less than the material's allowable stress, the formula for the allowable free span length is derived. Finally, taking the submarine pipelines works in Bohai bay as a case history, the allowable free span length of the submarine pipelines was calculated. The calculation results show that a part of the pipelines' span lengths exceed the allowable span lengths, and they must be reinforced.

Key words: nonlinear wave theories; embedded submarine pipeline; wave force; suspended length