

海底管线强度评估中的两个问题*

曾晓辉 邢静忠 柳春图 吴应湘

(中国科学院力学研究所 工程科学研究所)

摘要

海底管线是海上油气田生产设施的重要组成部分,它一旦发生破坏会在各方面引起重大损失。挖沟和提吊引起应力超标是海底管线两种重要的破坏形式。挖沟和提吊问题的难点是:1)二者都是动边界问题,悬空长度本身就是未知量;2)挖沟问题中应考虑台阶升高处土壤支持的弹性影响(这比刚性处理更准确,但这会使边界条件更复杂);3)提吊是一个几何非线性问题,求解难度较大。

本文给出挖沟和提吊作业状态下,海底管线的强度分析方法。在挖沟分析中,采用线性梁理论,将台阶升高处的土壤支持处理为线性弹簧。在提吊问题中,将管线模型化为大位移梁,采用打靶法,将边值问题转变为初值问题求解。文中还给出有关的典型数值计算结果。

* 中国海洋石油总公司资助项目

(一) 引言

海底管线是海上油气田生产设施的重要组成部分,是保证油气田正常运转的生命线。我国的海底油气管线已具备了相当规模(目前总长度约有2500公里),而且还在不断发展。随着油气产量的增加,管线规模还将进一步扩大。

海底管线造价高昂(每公里30~100万美元),如发生某种形式的破坏,仅直接的经济损失就很大。除此之外,还将导致油气田的停产和海洋污染。这不仅影响工业生产和人民正常生活,而且对生态环境也会产生难以消除的破坏。因此,对管线进行安全评估是非常重要的。

海底管线的破坏形式较多,本文将研究挖沟和提吊这两种工况下,管线的强度问题。

分析挖沟和提吊问题的难点是:1)二者都是动边界问题,悬空长度本身就是未知量;2)因为台阶处土壤松软,所以在挖沟工况的强度分析中应考虑台阶处土壤支持的弹性影响,这比刚性处理更能反映实际情况,目前之所以采用刚性处理方法是考虑弹性影响会使边界条件更复杂,求解不易;3)提吊是一个几何非线性问题,而且边界待定,所以求解难度较大。

综合考虑上述难点,本文研究了海底管线在挖沟和提吊这两种作业状态下的强度问题,进行了相应的分析和计算。在挖沟分析中,采用线性梁理论,将台阶升高处的土壤支持处理为线性弹簧。在提吊问题中,将管线模型化为大位移梁,采用打靶法,将边值问题转变为初值问题求解。

(二) 挖沟

要将管线埋在土中需要进行挖沟作业,这会引起海底不平,将地面不平程度用一个高度为 δ 的台阶表示(图1)。

当把台阶处的土壤当作完全刚性时,管线的变形如图1(a)所示。由于有一个台阶升高,管线在台阶以上和以下分别被抬起长度为 L_1 和 L_2 的两部分。由于 L_1 和 L_2 的值是待定的,因此这是一个动边界问题。管线与土壤在A点处接触,分析表明,当把土当作完全刚性的地基时,A点处的弯曲应力最大^[1]。

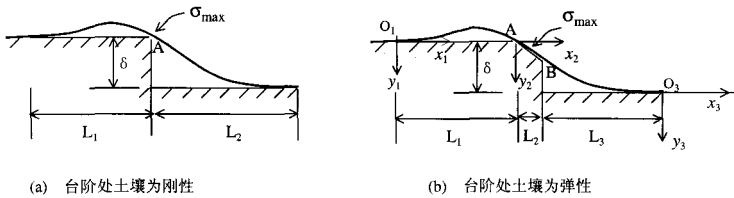


图1 挖沟状态下的管线

实际上,台阶是由某种机械设备挖开海底土壤形成的,因此该处土壤相对较软,考虑土壤弹性更接近实际情况。考虑弹性影响后,在台阶处,管线和土壤不只在A点这一个点上接触,土的变形使管线与土在AB段发生接触,如图1(b)所示。这时,不仅两段悬空长度 L_1 和 L_3 待定,AB段长度 L_2 也是待定的。本文的分析表明,最大弯曲应力发生在AB段的某点上。土基的反力系数越大(即土越硬),应力最大点越接近A。

本文将台阶处的土处理为弹性地基,AB段的管线作为弹性地基梁,则挖沟状态下的管线变形如图1(b)所示。由于有台阶升高,所以管线有 L_1 和 L_3 这两段悬空, L_2 这一段支持在弹性地基上。下面对其进行分析。

引入无量纲量:

$$x_i^* = \frac{x_i}{L_c}, \quad y_i^* = \frac{y_i}{L_c}, \quad l_i^* = \frac{L_i}{L_c} \quad (i=1, 2, 3), \quad \delta^* = \frac{\delta}{L_c}$$

$$L_c^3 = \frac{EI}{w}$$

其中, L_c 为管线的特征长度, EI 是管线的弯曲刚度, w 是单位长度管线重量。

无量纲量表示的管线控制方程为:

$$\frac{d^4 y_i^*}{dx_i^{*4}} = 1, \quad (i=1, 3) \quad (1)$$

$$\frac{d^4 y_2^*}{dx_2^{*4}} + \frac{kDL_c}{w} y_2^* = 1 \quad (2)$$

其中 D 是管线外径, k 是土的地基反力系数。

方程(1)(2)的解为:

$$y_1^* = \frac{x_1^{*4}}{24} + k_3 x_1^{*3} + k_2 x_1^{*2} + k_1 x_1^* + k_0 \quad (3)$$

$$y_2^* = e^{\alpha x_2^*} (c_1 \cos \alpha x_2^* + c_2 \sin \alpha x_2^*) + e^{-\alpha x_2^*} (c_3 \cos \alpha x_2^* + c_4 \sin \alpha x_2^*) \quad (4)$$

$$y_3^* = \frac{x_3^{*4}}{24} + d_3 x_3^{*3} + d_2 x_3^{*2} + d_1 x_3^* + d_0 \quad (5)$$

其中, $\alpha = \sqrt[4]{kDL_c/4w}$ 。边界条件为:

$$x_1^* = 0 \text{ 时:} \quad y_1^* = 0, \quad \frac{dy_1^*}{dx_1^*} = 0, \quad \frac{d^2 y_1^*}{dx_1^{*2}} = 0 \quad (6)$$

$$x_2^* = 0 \text{ (即 } x_1^* = l_1^* \text{)} \text{ 时: } y_1^* = 0, \quad y_2^* = 0, \quad \left. \frac{dy_1^*}{dx_1^*} \right|_{x_1^*=l_1^*} = \left. \frac{dy_2^*}{dx_2^*} \right|_{x_2^*=0},$$

$$\left. \frac{d^2 y_1^*}{dx_1^{*2}} \right|_{x_1^*=l_1^*} = \left. \frac{d^2 y_2^*}{dx_2^{*2}} \right|_{x_2^*=0}, \quad \left. \frac{d^3 y_1^*}{dx_1^{*3}} \right|_{x_1^*=l_1^*} = \left. \frac{d^3 y_2^*}{dx_2^{*3}} \right|_{x_2^*=0} \quad (7)$$

$$x_2^* = l_2^* \text{ (即 } x_3^* = -l_3^* \text{)} \text{ 时: } y_2^* \Big|_{x_2^*=l_2^*} - y_3^* \Big|_{x_3^*=-l_3^*} = \delta^*, \quad \left. \frac{dy_2^*}{dx_2^*} \right|_{x_2^*=l_2^*} = \left. \frac{dy_3^*}{dx_3^*} \right|_{x_3^*=-l_3^*},$$

$$\left. \frac{d^2 y_2^*}{dx_2^{*2}} \right|_{x_2^*=l_2^*} = \left. \frac{d^2 y_3^*}{dx_3^{*2}} \right|_{x_3^*=-l_3^*}, \quad \left. \frac{d^3 y_2^*}{dx_2^{*3}} \right|_{x_2^*=l_2^*} = \left. \frac{d^3 y_3^*}{dx_3^{*3}} \right|_{x_3^*=-l_3^*} \quad (8)$$

$$x_3^* = 0 \text{ 时: } y_3^* = 0, \quad \frac{dy_3^*}{dx_3^*} = 0, \quad \frac{d^2 y_3^*}{dx_3^{*2}} = 0 \quad (9)$$

式(3)~(5)中有12个未知参数: $k_i, d_i (i=0,1,2,3), c_i (i=1,2,3,4)$; 此外, $l_1^* l_2^* l_3^*$ 也是未知的, 因此共有15个未知参数。式(7)~(9)共提供15个边界条件, 因此正好可以确定这15个未知数。由于用以求未知参数的方程(7)~(9)是非线性方程组, 所以需要用计算机迭代求解。

在所有未知参数都解出后, 就可以得到管线的挠曲线形状 y_1, y_2, y_3 。进而可以得到每个剖面最外侧纤维的弯曲应力 $\sigma(x)$ 沿管长的分布:

$$\sigma(x) = \frac{EID}{2I} \frac{d^2 y_i}{dx_i^2}$$

用无量纲量表示则有:

$$\sigma(x^*) = \frac{ED}{2L_c} \frac{d^2 y_i^*}{dx_i^{*2}}$$

下面给出一个算例。管线的基本参数为: $EI = 6.09 \times 10^7 \text{ Nm}^2$, $w = 3204.16 \text{ N/m}$, $D = 0.4 \text{ m}$, $\delta = 1.34 \text{ m}$, 土基支反力系数 k 取不同的数值 (即 α 取不同数值), 以观察 k 对挠曲线及应力分布的影响。图2和图3给出 α 分别取 5, 9.55, 15, 120, ∞ 时, 某挖沟状态下管线的挠曲线和截面最外侧纤维的应力分布。其中 $x = 0$ 表示台阶处的 A 点。

从图中可以看出: 1) 随着 α 的增大, 台阶上部管线的悬空长度增大, 下部悬空长度减小; 2) 考虑土的弹性后, 最大弯曲应力发生在与台阶接触的那段管线中 (即图 1b 中的 AB 段) 的某点, 而把土当作刚性地基时, 最大弯曲应力在 A 点; 3) 随着 α 的增大, 管线最大弯曲应力增大, 并且位置向图 1b 中的 A 点逐渐靠近, $\alpha \rightarrow \infty$ 时最大弯曲应力发生在 A 点; 4) $\alpha > 10$ 时, 不同 α 对应的管线挠曲线及弯曲应力分布曲线非常接近。

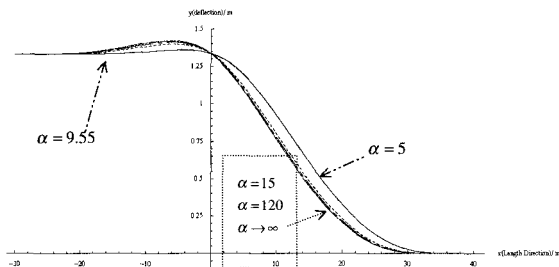


图2 不同土基反力系数情况下管线挖沟工况下的挠度曲线

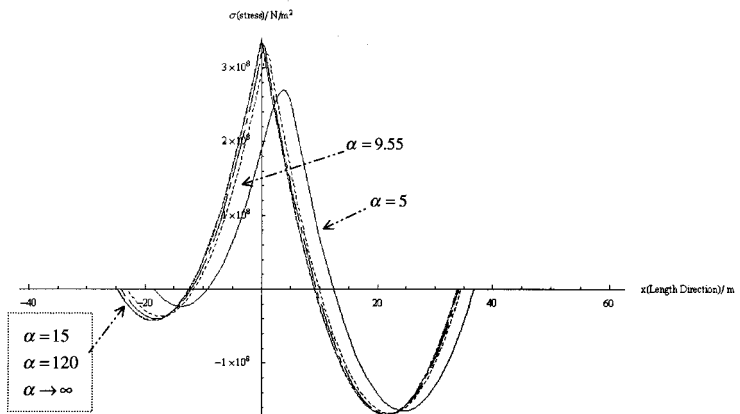


图3 不同土基反力系数情况下管线挖沟工况下的最大弯曲应力曲线

(三) 海管提吊

为把海底管线与立管进行对接, 或对海管进行修理, 需要把海管提吊起来(图4)。在这一过程中要保证管线最大应力不超过许用值。海管在提吊过程中处于几何非线性状态, 其控制方程的求解较为困难。主要表现在: 微分方程阶次较高, 边界可动。目前多采用差分法处理该问题, 但用差分法求解计算量大且精度有限。

本文首先将各变量无量纲化, 然后忽略轴向变形, 建立大位移管线的控制方程组(由6个一阶微分方程构成), 最后采用打靶法将边值问题转化为初值问题数值求解。

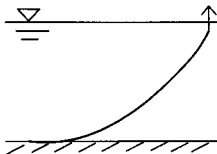


图4 海管提吊示意图

海管水中单位长度重量为 w , 管轴线与水平方向的夹角为 $\theta(s)$, 管截面上的内力有轴力 $N(s)$, 弯矩 $M(s)$ 和剪力 $Q(s)$, 管轴线上任意一点的铅直和水平位移分别为 $y(s)$, $u(s)$, 管线的悬空段长度为 a 。引入无量纲变换:

$$\xi = \frac{s}{a}, \quad y_n(\xi) = \frac{y(s)}{a}, \quad u_n(\xi) = \frac{u(s)}{a}, \quad N_n(\xi) = \frac{N(s)}{qa}, \quad Q_n(\xi) = \frac{Q(s)}{qa}, \quad M_n(\xi) = \frac{M(s)}{qa^2} \quad (10)$$

用无量纲量表示的管线控制方程为:

$$-\sin \theta + \frac{dN_n}{d\xi} + Q_n \frac{d\theta}{d\xi} = 0 \quad (11)$$

$$-\cos \theta - \frac{dQ_n}{d\xi} + N_n \frac{d\theta}{d\xi} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{dM_n}{d\xi} - Q_n = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d\theta}{d\xi} = M_n \beta \quad (14)$$

$$\sin \theta = \frac{dy_n}{d\xi} \quad (15)$$

$$\cos \theta = \frac{du_n}{d\xi} + 1 \quad (16)$$

其中: $\beta = \frac{wa^3}{EI}$ 。

方程(11)~(16)组成了海管提吊的6个控制微分方程,该方程组包含了3个内力,2个位移和1个转角,共6个未知量。

边界条件为:

在 $\xi = 0$ 处,挠度、转角、水平位移、水平轴力、弯矩均为零,即:

$$\xi = 0, y_n(0) = 0, \theta(0) = 0, u_n(0) = 0, N_n(0) = 0, M_n(0) = 0 \quad (17)$$

在 $\xi = 1$ 处,弯矩为零,即:

$$M_n(1) = 0 \quad (18)$$

用打靶法将该边值问题转化为一个初值问题求解。取初始位置的剪力 $Q_n(0) = t$ 作为一个打靶参数,调整该参数 t 使右侧的边界条件 $M_n(1) = 0$ 满足。此时的解答即为实际问题的解答。

在整个海管提吊过程中,无量纲参数 β 对应于不同的提吊阶段。给定一系列的参数 β 可以得到相应阶段的变形和内力分布。经过计算得到 $\beta = 5, 10, 15, 20, 30, \dots, 90$ 等阶段的变形情况和内力分布情况如图5~图8。注意到在 β 值很大之后,最大弯矩的峰值趋近于一个极限值。这是因为在提吊到变形很大的情况下,弯曲变形大体接近,差别主要体现在提起弧长不同,所以与地面接触部分附近的弯曲变形形状和内力变化规律是比较类似的。

(四) 结 论

海底管线是近海油气开发过程中必不可少的结构物。本文对挖沟和提吊这两种工况下的海底管线进行了力学分析。

在分析挖沟工况时,考虑了土地基的弹性影响,发现了挠度和应力分布都不同于刚性地基的情况;当土的反力系数很大时,挠度和应力趋近于刚性地基解。由于海管提吊是几何非线性的动边界问题,控制方程求解较困难,因此本文采用打靶法将边值问题化为初值问题求解,得到了各提吊阶段的一些有代表性的解。

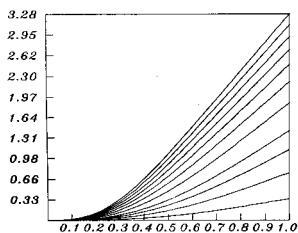


图5 挠度随弧长的变化

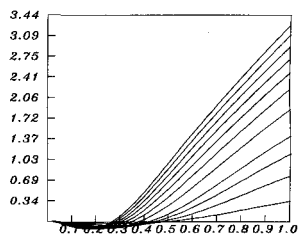


图6 轴力随弧长的变化

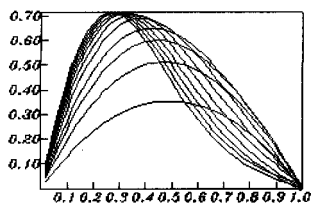


图7 弯矩随弧长的变化

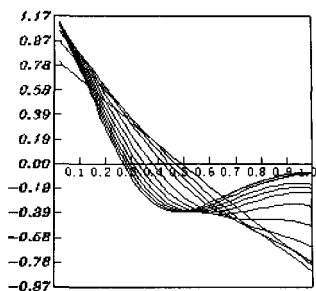


图8 剪力随弧长的变化

参 考 文 献

- [1] 曾晓辉, 邢静忠, 柳春图, 吴应湘, 多作业状态下近海油气管线的力学分析及软件, 中国造船 (已录用, 2002年内发表)
- [2] 胡毓仁, 陈伯真, 海洋工程结构力学, 上海交通大学讲义, 1988

Two Problems in the Strength Assessment of Offshore Pipelines

ZENG Xiao-hui XING Jing-zhong LIU Chun-tu WU Ying-xiang
(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Offshore pipelines are indispensable structures during the marine petroleum exploitation. Once pipelines fail, the consequence will be severe. Trenching and lifting of pipelines are two important operation states. Strength analysis of these two problems is full of difficulties: a) the boundary is moveable; b) the soil at the step should be taken as elastic support, while such treatment will make boundary conditions more complex; c) lifting of pipelines is an intrinsic non-linearity problem, which is hard to solve.

In this paper, the methods to solve these two problems are presented. Linear beam theory is adopted to analyze trenching, the support of step is treated as linear spring. Nonlinear beam model is used to simulate pipelines in the state of lifting. Shooting method is adopted to solve the generated differential equations. Finally, numerical examples are given.

作者简介

- 曾晓辉 男, 1972年4月出生, 副研究员。
邢静忠 男, 1966年出生, 副教授。
柳春图 男, 1935年出生, 研究员。
吴应湘 男, 1956年出生, 研究员。