

外部流体作用下管道输送流固耦合效应偏移分析

周知进¹, 阳宁³, 王钊¹, 袁毅¹, 罗柏文²

(1. 湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室, 湖南湘潭 411201;
3. 长沙矿冶研究院深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南长沙 410012)

摘要: 采用数值方法分析管道结构-外部流体相互耦合效应对管道输送过程中管道自由端偏移的影响。调查中充分考虑管道结构-流体耦合效应, 流体域与结构域通过拉格朗日-欧拉公式表述。以垂直悬臂提升管道为研究对象, 应用有限元软件 ADINA 对其外部流体-管道结构进行流固耦合特性研究。研究结果表明: ① 管道上端不论是采取固接还是铰接支撑, 外部流场以不同速度冲击管道时, 整个管道偏移变化不明显, 在同一流速下对管道偏移变化较为显著的地方集中在管道自由端, 最大偏移则出现在自由端顶点处; ② 管道上端无论是固结还是铰接, 随着管外流体速度增加, X 方向最大偏移的增量总是小于 Y 方向最大偏移的增量; 而 X 方向的最小偏移变化量则大于 Y 方向相应偏移; ③ 同一流速冲击下, 固结时 Y 方向的最小偏移略大于铰接时 Y 方向的最小偏移, 且两者在外部流速为 0.3 m/s 时出现极大值。

关键词: 流固耦合作用; 计算流体动力学; 提升管道; 偏移

中图分类号: U173.91 **文献标识码:** A

Pipe's offset analysis for a pipeline transporting under action of external fluid considering fluid-solid coupled effects

ZHOU Zhi-jin¹, YANG Ning³, WANG Zhao¹, YUAN Yi¹, LUO Bo-wen²

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
3. State Key Lab of Deepsea Mineral Resources Development and Utilization, Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, China)

Abstract: The effects of a pipeline-external fluid interaction on the offset of the free end of the pipe was analyzed with numerical methods, considering a fully coupled fluid-structure interaction (FSI). The fluid domain and structural domain were described with an arbitrary-Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation. A vertical cantilevered lifting pipe was taken as a study object. Its fluid-solid coupled characteristics were studied with the FE software ADINA. The results showed that either its upper end is fixed or hinged, the pipe's offset variation is not obvious when the external fluid impacts the pipe at different speeds, the maximum offset appears at the free end; with increase in the speed of the external fluid, the maximum offset variation in X -direction is always less than that in Y -direction, the minimum offset variation in X -direction is larger than that in Y -direction; under the impact of the external fluid with the same speed, the minimum offset in Y -direction with the upper end fixed is slightly larger than that with the upper end hinged, both of them become greater when the external fluid speed is 0.3 m/sec.

Key words: fluid-structure interaction; computational fluid dynamics; lifting pipe; offset

垂直悬臂提升管道在输送固液两相流过程中, 管道(固体)为弹性体, 受到内外流体作用, 流体的作用引起管道壁发生变形或运动, 管道的变形或运动又反过来改变流场形态, 从而改变流体流动状态, 流动状态的

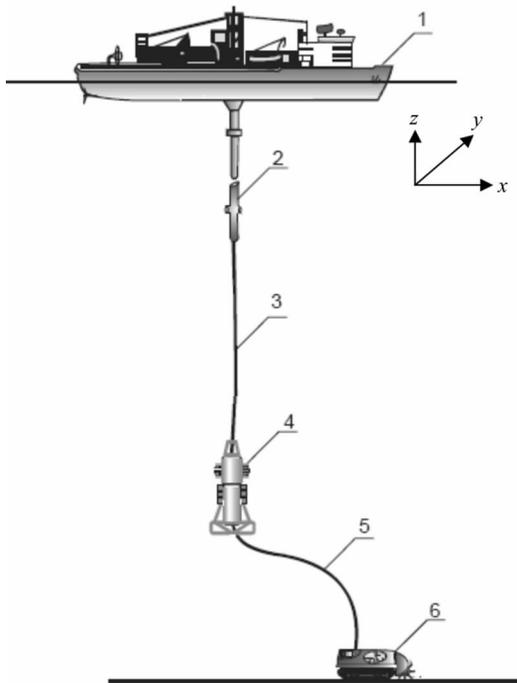
改变又会影响管道的运动和变形, 管道与流体之间的这种相互作用, 在不同约束支撑下将产生多种形态各异的流固耦合现象^[3], 即管道与流体之间强非线性耦合作用。以往学者大多对水平输送、固定支撑、弹性支撑(多点)等管道进行研究^[4-7], 对于一端支撑垂直提升管道振动研究较少, 更没有研究具有升沉补偿装置的铰接支撑情况下输送过程的流固耦合作用下管道的动态特性^[13-14]。

基金项目: 国家自然科学基金(50875081)资助

收稿日期: 2012-04-19 修改稿收到日期: 2012-07-31

第一作者 周知进 男, 博士, 教授, 1969年生

深海采矿硬管输送系统上端采用升沉补偿装置悬挂在海面采矿船的平台,下端通过中间舱、软管与海底集矿机相连。如图 1 所示。由于采矿船的纵摇、横摇、拖航以及集矿机行走运动的相互作用,以及波浪、海流的作用,扬矿硬管已不可能保持垂直位移,管道下端将产生较大偏移。本研究基于深海采矿扬矿硬管受到海流冲击情况下,充分考虑管道-流体流固耦合效应,计算并分析了硬管在不同海流阻力作用下的偏移特性。研究这个偏移特性的目的有二:① 为设计出合理的升沉补偿装置提供设计依据;② 精确预测集矿机作业的合理区域,从而为控制系统提供原始依据。



1. 采矿船; 2. 浮力单元; 3. 扬矿硬管;
4. 中间舱; 5. 扬矿软管; 6. 集矿机

图 1 深海采矿系统示意图

Fig. 1 Deep-sea mining system schematic

1 扬矿硬管受力分析

扬矿硬管的上端与采矿船相连接,其下端与中间舱相连接,中间舱与集矿机通过扬矿软管相连接。扬矿软管的刚度较小,且附着有浮力材料,对扬矿硬管的作用力可以忽略不计,所以将扬矿硬管下端作为自由端来处理。扬矿系统工作处于海洋环境里,必然受到海浪、海流、采矿船拖航的作用。扬矿硬管还受到自身的重力、扬矿泵自身重力、中间舱,以及浮力和内部矿浆的作用。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho u \otimes u - P) = \rho F \quad (2)$$

其中: $P = \{p_{ij}\}$ 。

$$p_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \mu' \text{div}u\delta_{ij} \quad (3)$$

其中: $\mu' = \lambda + \frac{2}{3}\mu$, 称为膨胀粘度性系数,又称第二粘度性系数。

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho e + \frac{1}{2}\rho u^2\right) + \text{div}\left[\left(\rho e + \frac{1}{2}\rho u^2\right)u - \rho u\right] = \text{div}(k \text{grad}T) \quad (4)$$

其中: k 为热传导系数。

以上方程构成粘性流体力学方程。

对于粘性不可压的粘性流体,密度 ρ 为常数,取 $\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ 则有:

$$\text{div}u = 0 \quad (5)$$

则动量守恒方程可变为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \mu \Delta u_i + \frac{\partial p}{\partial x_i} = F_i, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

则上面的能量守恒和动量守恒方程为三维不可压缩粘性流体的 Navier-Stokes 方程,简称 N-S 方程。

考虑到海水是非理想流体,且其与扬矿系统的相对速度不可忽略,所以在计算时将海水视为粘性流体。从流体力学中可知当粘性流体绕流不是流线型物体的时候,都将产生边界层分离的绕流脱体现象。显然扬矿管道形状为圆柱体,则扬矿硬管为不是流线型物体。粘性流体绕流不是流线型物体在不同雷诺数下,其绕流现象有所不同。由流体力学可知:

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (7)$$

式中: ρ 为海水密度; v 为海水流速; d 为管道直径; η 为海水粘度系数(与海水温度有关)。

式(7)在深海采矿中会起到变化的是海水流速 v ,其他参数的微小变化可以忽略。扬矿硬管在海水中工作时,海流与扬矿硬管的相对速度为:

$$V = V_c + V_h \quad (8)$$

式中: V_c 为采矿船的航速; V_h 为某深度的洋流速度。

海流速度求解公式:

$$V_h = (V_a - V_b) e^{(-h/H)} + V_b \quad (9)$$

式中: e 为自然常数; V_h 为水深 h 处的流速; V_a 为海面洋流速度; V_b 为深海洋流速度; h 为管道计算深度; H 为水深。

扬矿硬管绕流时的阻力 F_D 主要是由摩擦阻力 F_f 和压差阻力 F_p 两部分组成^[16],即:

$$F_D = F_f + F_p \quad (10)$$

$$F_f = \int_A \tau_0 \sin\theta dA \quad (11)$$

$$F_p = \int_A p \sin\theta dA \quad (12)$$

式中: A 为物体的总表面积; θ 为物体表面上微分面积 dA 的法线与流速方向的夹角。

摩擦阻力和压差阻力均可表示为单位体积来流的动能 $\frac{\rho U_0^2}{2}$ 与某一面积的乘积, 再加上一个阻力系数, 即:

$$F_f = C_f \frac{\rho U_0^2}{2} A_f \quad (13)$$

$$F_p = C_p \frac{\rho U_0^2}{2} A_p \quad (14)$$

式中: C_f 为摩擦阻力系数; C_p 为压差阻力系数; A_f 为切应力作用面积; A_p 为扬矿硬管与流速方向垂直的迎流投影面积。

扬矿系统工作过程中不仅海流和采矿船拖航会产生拖曳力, 海浪也一样会产生拖曳力, 这种力与海水的密度、波浪大小形态和扬矿硬管的几何形状密切相关。其计算公式为:

$$f = \frac{1}{2} \rho_w C_D |u - y'| (u - y') + \rho_w C_M \frac{\pi D^2}{4} a_y - \rho_w (C_M - 1) \frac{\pi D^2}{4} y'' \quad (15)$$

式中: u 为水质点的水平速度; C_D 为阻力系数; a_y 为水质点的水平加速度; C_M 为惯性力系数; D 为扬矿硬管直径; y 为扬矿硬管横向偏移; ρ_w 为海水密度。

2 管道自由端偏移分析

扬矿硬管上端在不同的约束条件下, 由于管道外流体的冲击作用所产生的偏移也十分重要, 这是因为深海采矿硬管输送距离长, 最低端偏移距离大小将对扬矿软管拉扯作用非常关键, 进而影响集矿机运行稳定性。因此, 对两种不同约束条件下的横向液动力产生的偏移进行分析。

2.1 扬矿硬管上端为固接情况下管道自由端偏移分析

设置扬矿硬管下端简化为自由端, 上端为固接, 即 x 、 y 、 z 、 rx 、 ry 、 rz 六个自由度都约束。海流速度数值分析从 0.1 m/s 开始, 以 0.2 m/s 为间隔进行仿真, 分析其自由端顶点处偏移变化情况, 直到 1.7 m/s 为止, 其偏移图如图 2 和图 3 所示。

由图 4 和图 5 可见, 在固接约束条件和外部流场不同流速的情况下, 整个管道的偏移由上到下向 Y 轴正方向逐渐变大。管道迎水流一面的 X 轴方向偏移要大于另外一面, 并且随着水深增加而增加, 最大偏移存在于管道迎水流面的最下端。同时从图上可以看出, 固结时 Y 方向的最大位移与 X 方向的最小位移沿流体速度轴呈现某一程度的弱对称性(数量级不一样)。而 X 方向的最大位移则与 Y 方向的最小位移呈现相同的变化趋势。



图 2 固结时流场速度为 0.1 m/s 时 X 和 Y 方向偏移

Fig. 2 External fluid velocity is 0.1 m/s at the direction of x and y direction offset, fixed connection



图 3 固结时流场速度为 1.7 m/s 时 X 和 Y 方向的偏移

Fig. 3 External fluid velocity is 1.7 m/s at the direction of x and y direction offset, fixed connection

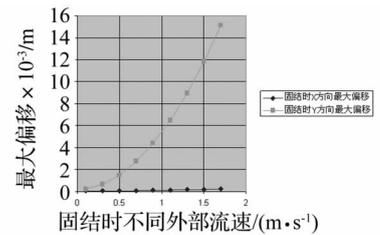


图 4 固结情况管道低端 X 、 Y 方向最大偏移

Fig. 4 The maxium offset at the direction of X and Y under external fluid velocity, fixed connection

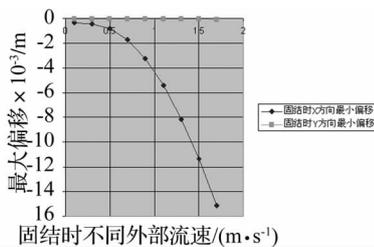


图 5 固结情况管道低端 X 、 Y 方向最小偏移

Fig. 5 The minium offset at the direction of X and Y under external fluid velocity of, fixed connection



图 6 铰接时流场速度为 0.1 m/s 时 X 和 Y 方向的偏移

Fig. 6 External fluid velocity is 0.1 m/s at the direction of x and y direction offset articulated



图 7 铰接时流场速度为 1.7 m/s 时 X 和 Y 方向的偏移

Fig. 7 External fluid velocity is 1.7 m/s at the direction of x and y direction offset articulated

2.2 扬矿硬管上端铰接情况下管道自由端的偏移分析

设置扬矿硬管下端为自由端,上端为铰接,即 x 、 y 、 z 三个自由度约束 r_x 、 r_y 、 r_z 三个自由度不约束。从 0.1 m/s 开始,以每 0.2 m/s 为间隔进行数值仿真,分析其偏移变化情况,直到 1.7 m/s 时结束,其自由端偏移图。如图 6 和图 7 所示。

由图 8 和图 9 可见,在铰接约束条件和外部流场不同流速的情况下,整个管道的偏移由上到下 Y 轴正方向逐渐变大。管道迎水流一面 X 轴方向偏移要大于另外一面,并且随着深度增加而增加,最大偏移出现在管道迎水流面的最低端。其余变化趋势与固结时具有相同规律。

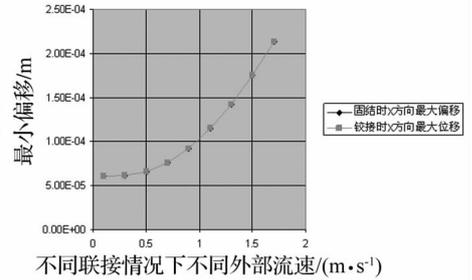
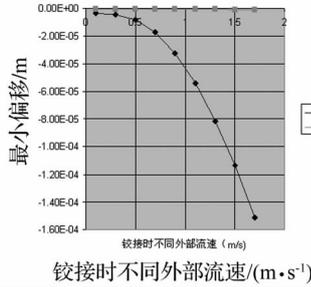
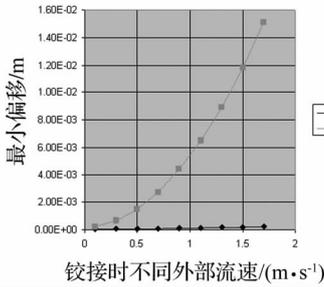


图 8 铰接情况管道低端 X 、 Y 方向最大偏移
Fig. 8 The Maxium offset at the direction of X and Y axis under external fluid velocity, articulated

图 9 铰接情况管道低端 X 、 Y 方向最小偏移
Fig. 9 The Minium offset at the direction of X and Y direction under external fluid velocity, articulated

图 10 两种连接方式不同外部流场速度时 X 方向最大偏移
Fig. 10 Curves of equivalent stress at the different external fluid speed with two different connections

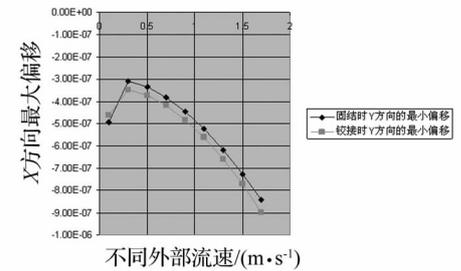
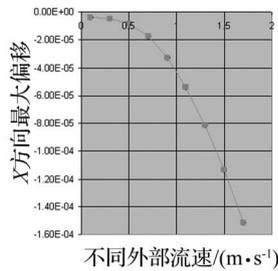
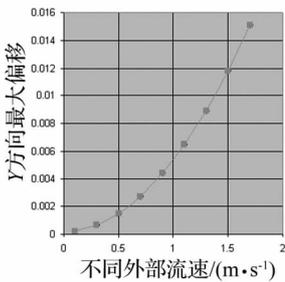


图 11 两种连接方式不同外部流场速度时 Y 方向最大偏移
Fig. 11 Curves of equivalent stress at the different external fluid speed articulated

图 12 两种连接方式不同外部流场速度时 X 方向最小偏移
Fig. 12 Curves of equivalent stress at the different external fluid speed with two different connections

图 13 两种连接方式不同外部流场速度时 Y 方向最小偏移
Fig. 13 Curves of equivalent stress at the of different external fluid speed articulated

2.3 两种联接方式下管道底端偏移的对比

扬矿管道上端采用固结和铰接两种不同支撑方式,获得不同管外流速情况下管道应力的最大最小值,为此分别画出 X 方向最大偏移与流速曲线和 Y 方向最大偏移与流体流速曲线,结果如图 10 和图 11 所示。为了探讨 X 方向最小偏移与 Y 方向最小偏移在两种支撑情况下的变化规律,也分别画出了 X 与 Y 方向的关系曲线。如图 12 和图 13 所示。

根据两种不同支撑下的 X 轴偏移曲线和 Y 轴偏移曲线分别进行对比分析,可以看出。无论是固结支撑还是铰接支撑情况, X 轴方向的最大偏移还是 Y 方向的最大偏移曲线基本重合,铰接情况下偏移值略高于固结情况下的偏移值,由此可知不同的约束方式在 X 、 Y 轴方向的偏移值变化非常微小,而 Y 轴方向的偏移差异略微比 X 轴方向明显,同样是铰接方式的高出固接方式下的偏移值。从图 13 可以得出,由于铰接支撑方式没有约束绕 Y 轴转动的自由度,这使得其负方向偏移量略大于固接方式,同样因为这个理由导致其最大偏移值小于固接方式,这在前面的不同支撑分析时得到了印证。所以仅从支撑方式不同来考虑管道自由端偏移量这个角度进行分析可知,支撑方式对管道偏移值的影响不是特别明显。

3 结论

采用两种不同支撑方式情况下计算出不同外部流速情况下管道自由端偏移值,获得了一些有意义的结论:

- (1) 管道上端不论采用固接或铰接支撑,外部流

场以不同速度冲击管道时,整个管道的偏移变化都不大,管道偏移剧烈变化则集中在管道自由端,最大偏移出现在管道自由端顶点。

(2) 管道上端无论是固结还是铰接, X 方向最大偏移增长总是小于 Y 方向最大偏移值的增长;而管道相应位置 X 方向的最小偏移则大于 Y 方向的最小偏移。

(3) 固结支撑时 Y 方向的最小偏移略大于铰接时 Y 方向的最小偏移。且两种支撑方式在外部流体速度为 0.3 m/s 时均出现局部极大值的情况。

参考文献

- [1] Heil M. An efficient solver for the fully coupled solution of large-offset fluid-structure interaction problems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, 193: 1-23.
- [2] Bathe K J, Zhang H. Finite element developments for general fluid flows with structural interactions [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 60: 213-232.
- [3] Hron J, Turek S. A monolithic FEM/multigrid solver for ALE formulation of fluid-structure interaction with application in biomechanics. *Lecture Notes in Computational Science and Engineering* [J]. *Fluid Structure Interaction-Modelling, Simulation, Optimisation*. Springer-Verlag 2006: 146-170.
- [4] Degroote J, Bathe K J, Vierendeels J. Performance of a new partitioned procedure versus a monolithic procedure in fluid-structure interaction [J]. *Computers and Structures*, 2009, 87: 793.
- [5] Vierendeels J, Lanoye L, Degroote J, et al. Implicit coupling of partitioned fluid-structure interaction problems with reduced order models [J]. *Computers and Structures*, 2007, 85 (11-14): 970-976.
- [6] Küttler U, Wall W. Fixed-point fluid-structure interaction solvers with dynamic relaxation [J]. *Computational Mechanics* 2008, 43 (1): 61-72.
- [7] Degroote J, Bruggeman P, Haelterman R, et al. Stability of a coupling technique for partitioned solvers in FSI applications [J]. *Computers and Structures*, 2008, 86 (23-24): 2224-2234.
- [8] Jaiman R, Jiao X, Geubelle P, et al. Conservative load transfer along curved fluid-solid interface with non-matching meshes [J]. *Journal of Computational Physics*, 2006, 218 (1): 372-397.
- [9] Vierendeels J, Dumont K, Dick E, et al. Analysis and stabilization of fluid-structure interaction algorithm for rigid-body motion [J]. *AIAA Journal*, 2005, 43 (12): 2549-2557.
- [10] Vierendeels J, Lanoye L, Degroote J, et al. Implicit coupling of partitioned fluid-structure interaction problems with reduced order models [J]. *Computers and Structures*, 2007, 85 (11-14): 970-976.
- [11] Küttler U, Wall W. Fixed-point fluid-structure interaction solvers with dynamic relaxation [J]. *Computational Mechanics* 2008, 43 (1): 61-72.
- [12] Degroote J, Bruggeman P, Haelterman R, et al. Stability of a coupling technique for partitioned solvers in FSI applications [J]. *Computers and Structures* 2008, 86 (23-24): 2224-2234.
- [13] 张学志, 黄维平, 李华军. 考虑流固耦合时的海洋平台结构非线性动力分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 2005, 35 (5): 823-826.
ZHANG Xue-zhi, HUANG Wei-ping, LI Hua-jun. Nonlinear and dynamic analysis of off shore platform considering fluid-structure interaction [J]. *Journal of ocean university of China*, 2005, 35 (5): 823-826.
- [14] 杨超, 范士娟. 输液管道流固耦合振动的数值分析 [J]. *振动与冲击* 2009, 28 (6): 2148-2157.
YANG Chao, FAN Shi-juan. Numerical analysis of fluid-structure coupling vibration of fluid-conveying [J]. *Journal of Vibration and Shock* 2009, 28 (6): 2148-2157.
- [15] 柳贡民, 李艳华, 朱卫华. 分支管流固耦合振动的频域解析解 [J]. *振动与冲击* 2010, 29 (7): 33-37.
LIU Gong-min, LI Yan-hua, ZHU Wei-hua. Analytical solution in frequency domain to vibration in a branched pipe with fluid structure interaction [J]. *Journal of Vibration and Shock* 2010, 29 (7): 33-37.
- [16] 税朗泉, 刘永寿, 顾致平, 等. 轴向周期激励下含脉动流体的筒支管道横向振动的稳定性分析 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31 (7): 133-136, 141.
SHUI Lang-guan, LIU Yong-shou, GU Zhi-ping et al. Stability of transverse vibration for a pinned-pinned pipe conveying pulsing fluid under axial periodic excitation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31 (7): 133-136, 141.