

S 型铺管船体-管线耦合运动数值模拟

黄山, 朱仁传, 顾晓帆

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海, 200240, Email:ouyedashan@sjtu.edu.cn)

摘要: S 型铺管因其铺管效率高、适应能力及持续作业能力强的特点而被广泛应用于海底管线铺设作业中。本文对 S 型铺管作业数值模拟进行了研究, 采用三维势流理论计算波浪对作业状态下的铺管船体的作用; 对于 S 形管线的垂弯段, 将模型简化为细长杆模型, 并采用有限元法实现张力响应的数值计算; 建立了船体-管线在目标海域多种环境载荷作用下的动力响应数理模型。该模型为 S 型铺管船体-管线耦合运动响应的快速预报提供了理论参考和数值实现手段。

关键词: S 型铺管; 三维势流理论; 细长杆模型

1 引言

深水铺管船是深水油气田开发建设的主要施工装备, 它担负着浮式生产平台的安装、海底管线的铺设以及立管系统安装任务。S 型铺管法是目前技术最成熟、应用也最为广泛的方法。该铺管方法通常在船体尾部增加一个圆弧形托管架, 管道在托管架支撑作用下自然地弯曲成 S 型曲线^[1]。S 型铺设对深水和浅水海域都适用, 可铺设长、大直径的管线。随着铺设水深的增加, 铺管船的动力性能标准越来越高^[2]。

在铺设作业条件下, 风、浪、流 3 种环境载荷相互影响; 同时, 铺管船、铺设管道、托管架三者作用力互为耦合, 这给船体运动及管线张力预报带来了困难。研究表明, 铺管船的 3 个自由度运动 (横摇、纵摇以及垂荡) 对铺管工况的影响最大, 而垂荡对于船体尾部的托管架的影响最大。铺管时, 横摇的幅度将会直接影响船内焊接等施工人员的正常工作。纵摇的幅度过大会导致铺管时管线受力过大而使管线屈曲甚至断裂。反过来, 由于管道的跨度比较长, 管道的自重、承受的波浪力、流力将通过托管架、张紧器传递给铺管船, 从而影响船的运动。此外, 托管架所受的载荷也通过与船体之间的铰接传递给铺管船。因而, 对 S 型铺管船体-管线的耦合运动进行数值模拟, 具有较高的工程意义。

2 作业船体、管线和工况参数

2.1 铺管船参数

某 S 型铺管船总布置图见图 1，主作业线布置在主甲板上右侧，一直到延长至艉部，在作业线上安装管段装配作业等铺管设备和设施，在船艉安装可转动固定式托管架。S 型铺管主作业线上中后部安装一套 $2 \times 250\text{t}$ 的组合式张紧系统，在主甲板工作区域前部甲板上安装有一台 500t A & R 收放绞车，船艉安装的可转动固定式托管架长度 90m ，分为三段，曲率半径 $76.2 \sim 365.8\text{m}$ 。

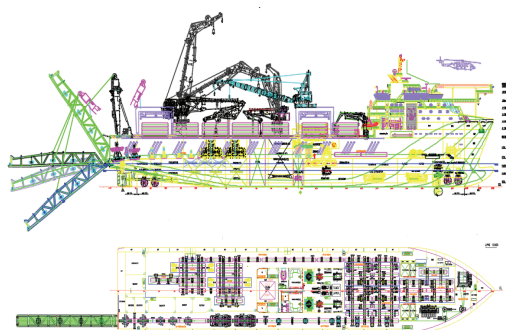


图 1 S 型铺管船总布置

该铺管船的主尺度见表 1。

表 1 铺管船主尺度

参数	L_{pp}	型宽 B	型深 D	吃水 T	惯性半径 K_{xx}	惯性半径 K_{yy}	惯性半径 K_{zz}
数值	165.00	35.00	12.00	9.50	12.25	48.46	48.34

2.2 管线参数

铺管作业所用管线材料为 X70 管线钢，管线的屈服强度为 482MPa ，极限强度为 565MPa ，管线外径为 6.0 英寸，壁厚为 15.875mm 。

2.3 作业工况

铺管船的作业水深 2000m ，管线与导管架的分离点在导管架长度末端。海浪的有义波高 3.0m ，跨零周期 8.0s ，浪向角为 180° 迎浪；风速为 17.1m/s ，风向与浪向相同；流速为 2.0kn ，流向与浪向相同。

3 数值模型

3.1 运动模型

忽略船体的弹性变形, 考虑到管线作用力对船体系统影响后, 铺管船的六自由度时域运动方程为:

$$\sum_{k=1}^6 M_{jk} \ddot{x}_k(t) = F_j^M(t) + F_{jW}(t) + F_j^w + F_j^c \quad (j=1,2,\dots,6) \quad (1)$$

其中: F_j^M 为第 j 个运动模态下的管线作用力, F_{jW} 、 F_j^w 和 F_j^c 分别为该运动模态对应的波浪、风、流作用力。

采用 Newmark- β 法对该运动方程进行求解。将每个时间步的解分解为估计值和修正值, 当前时间步的初始结果通过上一时间步进行估计, 通过反复迭代直至修正值为小量。

3.2 波浪力的计算模型

假设流体无黏、不可压, 流动无旋, 流场的速度可以用速度势的梯度表示。在微幅波假定下, 将整个流场的速度势做线性化分解:

$$\Phi_T = \Phi^I + \Phi^D + \sum_{j=1}^6 \Phi_j^R \quad (2)$$

式中, Φ^I 为入射势; Φ^D 为绕射势; Φ_j^R 为船舶在第 j 模态运动下的辐射势。相应地, 总的波浪力可以分解为入射力、绕射力和辐射力, 即:

$$\mathbf{F}_W(t) = \mathbf{F}^I(t) + \mathbf{F}^D(t) + \mathbf{F}^R(t) \quad (3)$$

辐射力可以表达为:

$$F_j^R(t) = - \sum_{k=1}^6 \left\{ \mu_{jk}(\infty) \ddot{x}_k(t) + \int_{-\infty}^t K_{jk}(t-\tau) \dot{x}_k(\tau) d\tau \right\} \quad (j=1,2,\dots,6) \quad (4)$$

式中: $\mu_{jk}(\infty)$ 为时域附加质量; $K_{jk}(t)$ 是时延函数, 表示自由表面记忆效应引起的势流阻尼项。

入射波浪力和绕射波浪力分别采用下式计算:

$$\mathbf{F}^I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{K}^I(t-\tau) \zeta(\tau) d\tau \quad ; \quad \mathbf{F}^D(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{K}^D(t-\tau) \zeta(\tau) d\tau \quad (5)$$

其中： $\mathbf{K}^I(t)$ 、 $\mathbf{K}^D(t)$ 分别表示入射力和绕射力的脉冲响应函数； $\zeta(t)$ 为波面升高时历。

3.3 管线的张力计算模型

S 型铺管管道几何形态通常被分为两段：从张紧器到升离点之间（拱弯段）；从升离点到海床接触点（垂弯段）。在垂弯段应力的计算中，相较弯矩和拉力，管线扭矩相对较小，忽略空间扭矩的影响，管线的动力学控制方程可简化为细长杆件，如下所示：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} + (B\mathbf{r}'')' - (\tilde{\lambda}\mathbf{r}')' = \mathbf{q} \quad (7)$$

式中， \mathbf{M} 为质量矩阵； B 为抗弯刚度； \mathbf{q} 为管线单位长度上的外载荷，包括重力，水静力和水动力； $T(s,t)$ 为管线的位置矢量，是弧长 s （沿曲线测量）和时间 t 的函数； $\tilde{\lambda}(s,t)$ 是一个标量， $\tilde{\lambda} = T - B\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}''$ ， T 表示管线轴向张力。此外， \mathbf{r} 需要满足拉升约束方程：

$$\mathbf{r}' \cdot \mathbf{r}' = (1 + \varepsilon)^2 \quad (8)$$

其中 $\varepsilon = \frac{T}{EA}$ ， EA 是管线的弹性模量。

方程 (7) 和方程 (8) 共同组成了细长杆模型的控制方程。将连续的管线离散为若干个单元，引入相应的形函数描述杆件位移和应力、载荷、质量矩阵，采用 Galerkin 法求残值平均将管线控制方程从偏微分方程转化为含有有限数量未知量的线性等式，并采用线弹性模型模拟海底的支持力，从而组装得到有限元方程对控制方程进行数值求解，得到管线的几何形态和相应的应力应变。

4 作业状态下船体-管线动态响应数值模拟

迎浪状态下，对 2.3 节所述的海况，采用 ITTC 双参数谱生成的船舶重心点处波面升高时间历程如下图 2 所示：

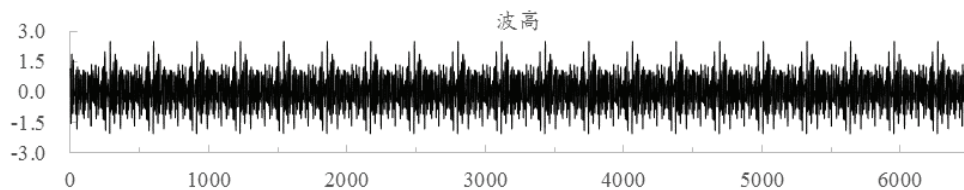


图2 迎浪状态下船舶重心处波面升高时历

采用该波面升高时历作为输入，对船体—管线的耦合运动进行数值模拟。时间步长 Δt 取 0.025s，总的数值模拟时间为 6500s，铺管船垂荡、纵摇方向的运动响应以及管线的张力响应数值结果如图 3 至图 5 所示。

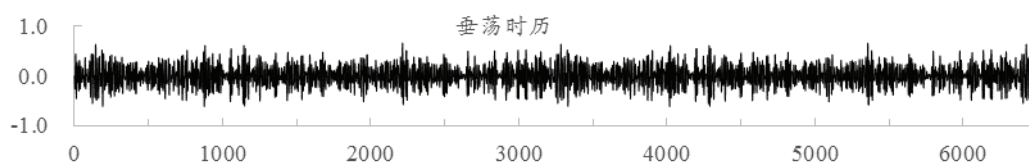


图3 迎浪状态下船舶垂荡运动时历

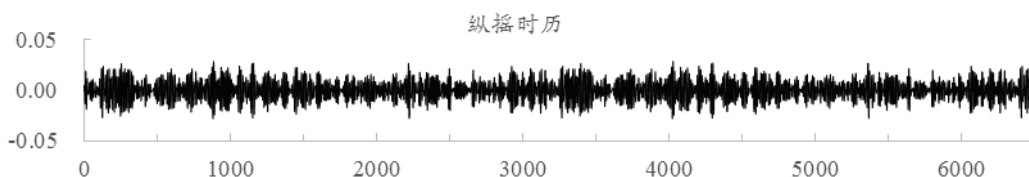


图4 迎浪状态下船舶纵摇运动时历

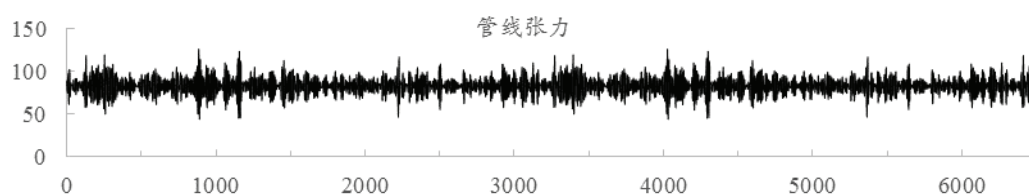


图5 作业工况 180° 浪向下张紧器张力时历

计算结果表明, 本文所构造的船体—管线耦合运动数值模拟模型, 计算效率高, 数个小时就可完成本次数值模拟共计 26 万个时间步的计算。为工程上快速预报 S 型铺管船体—管线耦合运动提供了新的方法。

5 结语

本文对 2000m 水深作业状态下风、浪、流联合作用的作业支持船运动响应和管线张力响应进行了数值模拟。对于作业船体, 忽略弹性变形从而将其运动简化为六自由度刚体运动; 在微幅波假设下, 采用线性三维时域势流理论计算波浪对船体的作用; Morison 公式被用于海流对管线的作用力的数值模拟; 忽略空间扭矩的影响, S 形管道曲线垂弯段被简化为细长杆模型, 在保证计算精度的同时, 最大限度地提高计算时间效率。该风、浪、流联合作用下的管-船耦合运动时域模拟混合模型理论简单、可操作性强、计算效率高, 为工程上对 S 型铺管作业运动响应和管线张力响应的数值模拟提供了新的思路。

参 考 文 献

- 1 马小燕.深水 S 型铺管作业中管线受力计算研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2012
- 2 王德军.S 型铺管船动力定位时域耦合分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2013
- 3 Specification A P I. 5L, Specification for Line Pipe[J]. Edition March, 2004.
- 4 朱仁传, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2019.
- 5 Veritas N. Environmental conditions and environmental loads[M]. Det Norske Veritas, 2000.
- 6 Faltinsen O M . 船舶与海洋工程环境载荷[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008.
- 7 Chen X. Studies on dynamic interaction between deep-water floating structures and their mooring/tendon systems[D]. Texas A & M University, 2002.
- 8 袁梦. 深海浮式结构物系泊系统的非线性时域分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- 9 W.克拉夫, J.彭兹恩. 结构动力学问题详解[M]. 1994.

Numerical simulation of dynamic coupling between vessel and pipeline in S-lay installation operations

HUANG Shan, ZHU Ren-chuan, GU Xiao-fan

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240.

Email: ouyedashan@sjtu.edu.cn)

Abstract: S-lay vessel is widely used in submarine pipeline laying because of its high efficiency, strong adaptability and sustainable operation ability. This work focuses on numerical model considering the dynamic coupling among pipeline, stinger and vessel. Wave Force on vessel is simulated by 3-D potential flow theory. Different numerical models are used in different positions of S-shaped pipelines. The over-bend segment is simulated by bending arc and sag-bend segment is simulated by slender rod model. The coupled dynamic response of vessel and pipeline is simulated under the combined action of wind, wave and current. Thus, present work provide guidance for dynamic coupling between vessel and pipeline in S-lay installation operations.

Key words: S-lay vessel; 3-D potential flow theory; Slender rod model.