

文章编号: 1000-4750(2011)Sup.I-0217-04

托管架托辊荷载的实验研究

*谢 鹏¹, 周 雷², 张向锋¹, 孙 贞², 唐琰林²

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁, 大连 116024; 2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘 要: 托管架托辊荷载是深水 S 型铺管中管道分析和托管架设计的主要荷载。管道大变形、托辊高度分布不均匀、船体运动等因素使托辊荷载的解析和数值求解都非常困难, 而常规的水池实验也因缩比太大难以保证实验精度。该文基于 dSPACE 仿真平台设计了模拟海底管道 S 型铺设的半实物仿真实验系统, 开展了中大比尺托管架与管道之间相互作用的模型实验研究。将静力实验结果与数值结果进行对比, 吻合良好, 在此基础上研究了托辊荷载的分布规律。通过对比托辊动力荷载和静力荷载, 进一步分析了深水铺管作业过程中船体运动对托辊动力荷载的影响。

关键词: 托管架; 管道; 半实物仿真实验; S 型铺管法; 托辊荷载

中图分类号: TE54 **文献标识码:** A

EXPERIMENT STUDY ON THE STINGER ROLLER LOAD

*XIE Peng¹, ZHOU Lei², ZHANG Xiang-feng¹, SUN Zhen², TANG Yan-lin²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Offshore Oil Engineering Company, Limited, Tianjin 300451, China)

Abstract: The stinger roller load is the main force during the analysis of the pipeline and the design of the stinger, but it is difficult to get the exact results through the regular calculation or experiment methods because of the nonlinear and random factors. The study on the roller load based on the hard-in-the-loop simulation experiment is carried out at the State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment. The roller load is directly measured by this system. The static force comparison between experiment and calculated one is made, and the results agree well with the calculated one. The dynamic reaction force between a stinger and a pipe may cause the fatigue and the increase of the stress of ship structures.

Key words: stinger; pipe; hardware-in-the-loop experiment; S-lay method; roller load

随着海洋石油的开发不断向深海发展, 对海底管道铺设深度的需求也不断增加, S 型铺管法因其铺设效率高已成为目前深水海底管道铺设中最常用的方法^[1-2]。许多学者在 S 型管道铺设系统方面进行过研究, 但大多数工作都集中在管道分析上。理论方面, Plunkett R^[3]针对海底悬链线进行分析,

最早采用奇异摄动法对管道微分方程进行求解; 数值方面, Dareing D W、Neathery R F^[4]基于 Newton 法的有限差分法求解铺设微分方程; Schmidt W F^[5]给出了考虑海底为弹性地基时的有限元分析; 实验方面, Langner G^[6]开展了水池模型实验; Palmer A C 于 2007 年会同 Brown R J^[7]进行了管线铺设的干式

收稿日期: 2010-10-23; 修改日期: 2011-01-16

基金项目: “863”项目(2006AA09105)

作者简介: *谢 鹏(1987—), 男, 安徽淮北人, 博士生, 博士, 主要从事海洋结构动力学研究(E-mail: xiepeng@mail.dlut.edu.cn);

周 雷(1978—), 男, 浙江嘉兴人, 工程师, 博士, 从事海洋工程结构设计(E-mail: zhoulei@mail.cooec.com.cn);

张向锋(1980—), 男, 河南商丘人, 博士生, 硕士, 主要从事海洋结构动力学研究(E-mail: zxfdu@gmail.com);

孙 贞(1982—), 女, 河北衡水人, 工程师, 硕士, 主要从事海洋结构动力学研究(E-mail: sunzhen@mail.cooec.com.cn);

唐琰林(1981—), 女, 山东东明人, 工程师, 硕士, 主要从事深海水管铺设相关技术研究(E-mail: tanyl@mail.cooec.com.cn).

实验。Callegari M 等^[8]采用铺管分析软件 Laying 对管道与托管架的作用力进行了数值计算研究,并提出了主动控制托辊力的方法。但该程序并不能对托管架结构进行准确建模,无法准确模拟管道与托管架相互作用的动态过程。在管道深水铺设实际过程中,托辊荷载(管道与托管架的相互作用力)常常是管道与托管系统发生破坏的直接荷载。这主要因为铺管时托管系统在风、浪、流、船体运动的影响下与管道发生相互碰撞,直接导致了托辊荷载的变化及管道局部应力的增加^[9]。由于在托管架上管道发生大变形、托辊高度及船体运动的随机性使得很难进行其相互作用过程的数值模拟。此外,对于常规的水池实验建造的托管架模型一般较小,也无法有效模拟铺管作业中托管架与管道的相互作用。目前对于此类问题的研究工作尚且不足。

本文基于 dSPACE 仿真平台建立了海底管道 S 型铺设的半实物仿真实验系统,开展了中大比尺托管架与管道之间相互作用模拟的干式模型实验,在此基础上研究了托辊荷载的分布规律。静力荷载与数值解具有较好的一致性,进一步分析了船体运动对托辊荷载的影响。

1 托管架半实物仿真模型实验

1.1 半实物仿真实验方法

半实物仿真实验是指在实验系统中同时采用物理模型和数学模型相结合的实验方法。该方法将系统的一部分以数学模型描述,并把它转化为仿真计算模型,另一部分以物理模型方式引入仿真回路^[10]。采用物理模型可将因非线性、随机等因素不易数学建模的部分以实物代替,提高实验精度;采用数学模型可以准确调整实验系统的参数及控制规律,提高实验结果的可靠性,缩短实验周期。

对于托管架半实物仿真模型实验系统,通过计算机建立铺管船运动的数学模型,输出信号驱动振动台运动;同时建立托管架与管道组成的 S 型海底管道铺设系统的物理模型,以模拟真实的海底管道铺设过程,研究管道与托管架相互作用的力学行为。托管架半实物仿真模型实验系统如图 1 所示。

1.2 实验系统设计

S 型铺管法进行管道铺设时,管道一般分为直线段、上弯段、下弯段 3 个部分。直线段指在铺管船上的管道部分,此部分只承受拉力;上弯段指管道离开船尾一直到托管架最后一个支撑滚轮的部

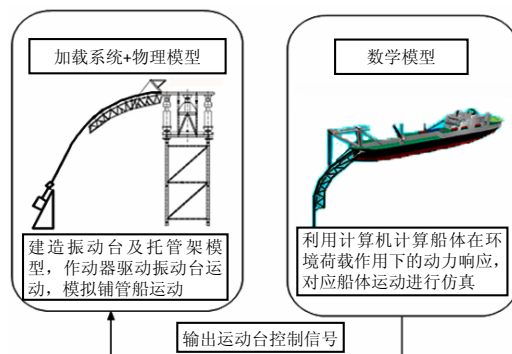


图1 托管架半实物仿真模型实验系统

Fig.1 Stinger hardware-in-the-loop model experiment system

分,在这一段中管道承受弯曲并且与托管架相接触,管道的重量依靠托管架来支撑;下弯段指托管架末端到管道与海床接触的部分,这部分主要承受重力和海水浮力作用。

托管架是 S 型管道铺设的关键设备之一,悬挂在铺管船尾部,在铺管过程中起到引导管道下水、控制管道脱离船体的曲率、防止管道由于过度弯曲而产生屈服或断裂。在铺管过程中,托管架受到重力、管道压力、船体运动、波浪的共同作用,其中管道压力起主要作用。管道在托管架上由若干托辊支撑,为点支撑而不是连续的圆弧型辊道支撑。铺管船、托管架和管道系统示意图如图 2 所示。

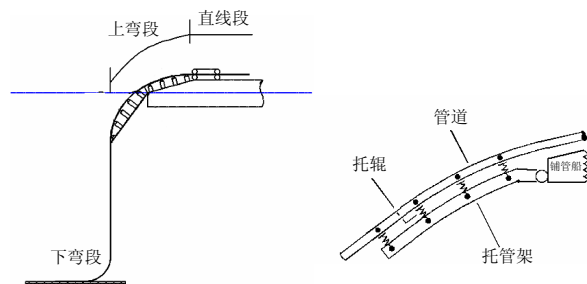


图2 铺管船、托管架和管道系统

Fig.2 Pipelay vessel/stinger and pipe system

基于上文所述的半实物仿真实验方法进行托管架半实物仿真实验系统设计。实验系统包括:船体运动模拟系统,托管架模型、管道及数据采集系统。下面分别介绍各子系统功能与有关设计参数。

船体运动模拟系统:船体运动模拟振动台由工作台面、支撑架、线性滑筒、液压伺服作动器及底部支座构成,由 dSPACE 实时仿真系统控制。台面工作尺寸为 2.5m×2.5m,并设计有模拟实际工程中托管架安装形式的托管架安装构件,以真实模拟与实际工程中类似的托管架约束条件。液压伺服作动器的行程为±75mm,其运动由 dSPACE 系统控制。该仿真平台基于 MATLAB/Simulink 的控制系统开

发,通过编程可以实现该船体运动的升沉、横摇、纵摇模拟。

托管架模型及管道系统:托管架模型由3节组成,总长4.4m,托管架与管道的相互作用力由托辊传递,管道采用直径12mm的不锈钢管模拟。本实验只模拟铺设在托管架上的管道,在截断点之后的管道的质量采用质量滑块模拟。通过对相应铺设工况下的管道线型进行分析,确定在管道截断点处的脱离角度以及配重质量。

数据采集系统:该系统包含动态信号测试所需的信号调理器(应变、振动等调理器)、直流电压放大器、抗混滤波器、A/D转换器、缓冲存储器以及采样控制和计算机通讯的全部硬件,并提供操作方便的控制软件及分析软件,是以计算机为基础、智能化的动态信号测试分析系统。通过该系统可以直接读取托辊上放置的压力传感器传回的数据。托管架半实物仿真模型实验系统实物图如图3所示。



图3 托管架半实物仿真模型实验系统实物图

Fig.3 Built stinger hardware-in-the-loop experiment system

2 实验工况及结果分析

本实验在大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室结构实验室进行,实验分为静力实验和动力实验两种实验工况。静力实验将管道安装在托管架上,施加配重荷载并直接测量托管架与管道的作用力;动力实验施加配重荷载并利用作动器驱动振动台模拟船体运动,测量托管架与管道的作用力。

2.1 静力工况

调节托辊高度使管道形状接近海底管道的铺管工况,在管道下端施加配重荷载200kg,直接测量托辊荷载。利用ANSYS对托管架模型及管道进行建模分析,计算静力情况下的托辊荷载,托管架杆件使用pipe16单元,铺设管道使用pipe16单元,节与节之间的连接件使用beam189单元,钢缆只承

受拉力,使用link8单元,托辊支撑杆使用combin14单元,配重使用mass21单元模拟,质量为200kg。数值计算模型图如图4所示。

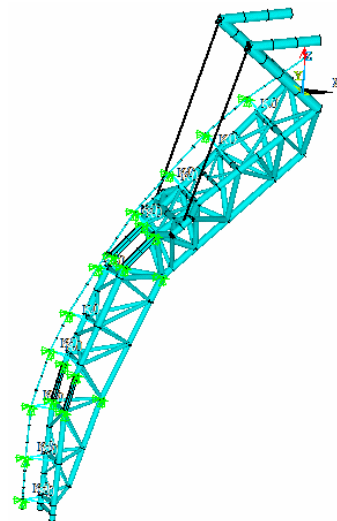


图4 托管架有限元模型

Fig.4 Stinger FEM model

实验1、实验2分别为静力实验中获得的两组数据,与数值计算的结果对比如下,结果见图5。

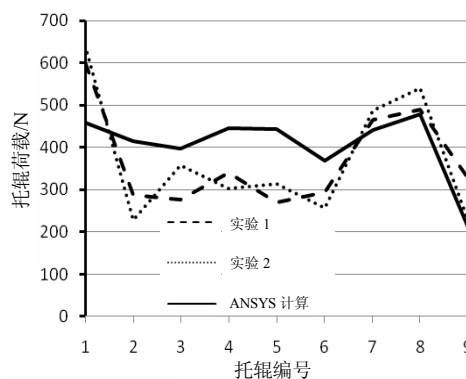


图5 实验结果和数值分析的对比

Fig.5 Comparison between experiment and numerical results

对比数值和实验结果有如下结论:

1) 数值计算结果稍大但基本趋势一致。模型实验中管道与托管架的接触并不光滑,托管架与管道间的接触摩擦作用使托辊荷载较数值计算中稍小。

2) 托辊荷载的大小基本平均分布,第9个托辊处荷载较小。这是由于在深水S型海底管道铺设时,管道脱离托管架时基本处于竖直状态,管道与托管架的接触造成的压力比较小。

3) 实验测得的托辊1的荷载较数值计算结果稍大,这是由于在数值计算中管道上端是按铰接处理的,而实验中的管道是用卡环固定在振动台上模拟原型中的约束情况。实验中对管道的约束更紧导致第1个托辊上的压力更大。

2.2 动力工况

图6给出了9个托辊在动力工况下托辊动力荷载及静力荷载的对比图。图6中前7s是静力情况下的托辊荷载,第7s启动振动台,使振动台按频率为0.25Hz,升沉幅度为31.8mm做升沉运动。该运动参数由数学模型计算获得,以代表在4.4m长托管架相匹配的铺管船常见运动特性。

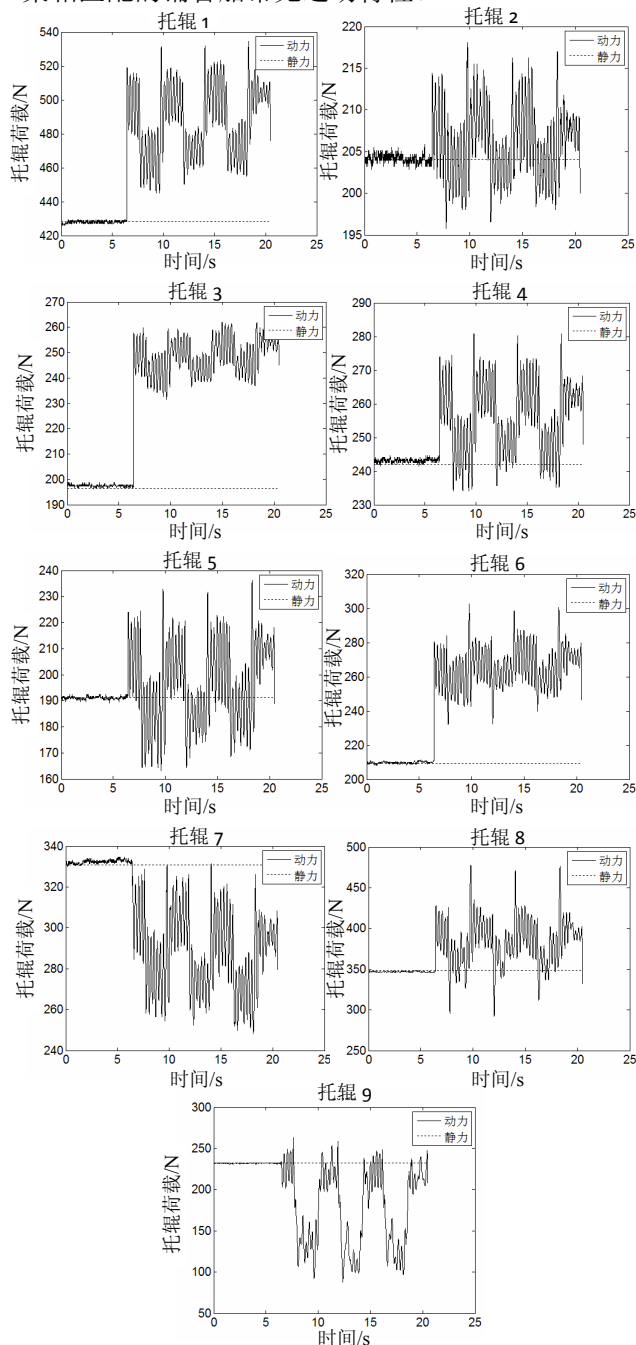


图6 托辊动力、静力荷载对比

Fig.6 Comparison between dynamic and static roller load

对比托辊的静力、动力荷载发现,托辊的动力荷载一般在静力荷载的20%—30%之间呈周期性的震荡。每个周期内的高频震荡则显示了在振动台做升沉运动时管道与托管架不停的发生碰撞,该荷载

将造成管道和托管架的疲劳及局部应力的增加。

3 结论

本文开展了深水海底管道S型铺设系统管道与托管架相互作用的半实物仿真模型实验研究。实际测量了托辊的静力、动力荷载,将静力荷载与数值计算结果进行了对比,吻合良好,实验结果反映了管道铺设中托辊荷载的分布规律,也证明了S型海底管道铺设半实验仿真实验系统的可靠性。从托辊的动力荷载分析了船体运动对托辊荷载的影响,船体运动会使托辊荷载在20%—30%的范围内成周期性震荡。铺管过程中,托管架和管道之间发生的高频碰撞将会造成管道局部应力的增加及相关结构的疲劳。该实验结论对于深水管道铺设系统的设计及操作具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Heerema E P. Recent achievements and present trends in deepwater pipe-lay systems [C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2005.
- [2] 王林. 深海托管架概念设计要素研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
Wang Lin. Conceptual design essentials of the stinger for deepwater [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [3] Plunkett R. Static bending stresses in catenaries and drill strings [J]. Journal of Engineering for Industry, 1967, 89(1): 31—36.
- [4] Dareing D W, Neathery R F. Marine pipeline analysis based on Newton's method with an arctic application [J]. Journal of Engineering for Industry, 1970, 92(4): 827—834.
- [5] Schmidt W F. Submarine pipeline analysis with an elastic foundation by the finite element method [J]. Journal of Engineering for Industry, 1977, 99(2): 480—484.
- [6] Langner G. The articulated stinger: A new tool for laying offshore pipelines [C]. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, 1969.
- [7] Brown R J, Palmer A C. Developing innovative deep water pipeline construction techniques with physical models [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2007, 129(1): 56—60.
- [8] Callegari M, Cannella F, Titti F M, Bruschi R, Torselletti E, Vitali L. Concurrent design of an active automated system for the control of stinger/pipe reaction forces of a marine pipelaying system [C]. Portofino: The International Workshop on Harbour, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation, 2000.
- [9] Gaus G F. Offshore pipelaying operations—Interaction of vessel motions and pipeline dynamic stress [J]. Applied Ocean Research, 1992(4): 175—190.
- [10] 单家元, 孟秀云, 丁艳. 半实物仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Shan Jiayuan, Meng Xiuyun, Ding Yan. Hardware-in-loop simulation [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2008. (in Chinese)