

文章编号:1005-9865(2018)02-0127-08

深水海底管道铺设安全辅助系统

高 爽¹,王法承²,汤 珂¹,李 斌³,李 杨¹

(1. 北京高泰深海技术有限公司,北京 100029; 2. 清华大学 土木工程系,北京 100084; 3. 海洋石油工程股份有限公司,天津 300452)

摘 要:此次研发的铺管安全辅助系统是一套自动化、简易化、旨在提高安装经济性和安全性的实时运行安全辅助系统,通过实时数据采集及处理,达到对安装期海管强度进行实时监测目的。系统组成包括设备系统和监测软件两部分。设备为系统提供辅助决策数据源;监测软件采用 C++语言编写,用于数据接收、解析,并通过 OrcaFlex API 调用商业有限元软件 OrcaFlex 为分析内核进行实时分析计算,以可视化界面输出管道应力、应变、触地点等信息,给予船上作业人员安全指导,及时作出决策。

关键词:铺管作业;安全辅助;设备配置;监测软件

中图分类号:P754 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2018.02.015

A vessel motion based pipeline safety installation assist system

GAO Shuang¹, WANG Facheng², TANG Ke¹, LI Bin³, LI Yang¹

(1. COTEC, Beijing 100029, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: Ocean engineering companies focus more attention on technology research and development for decreasing cost and increasing benefit to match lower oil prices. Offshore operation become a key research item as it costs 30-50% of the total package. Subsea pipeline installation has characteristics of "hidden", and its design is often based on a lot of conservative assumptions. The pipeline installation monitor is a set of automatic and easy operation safety assistant system to improve economy and safety by monitoring subsea pipeline strength during installation through the real-time data acquisition and processing. The system is composed of devices and monitoring software. The devices provide real-time analysis data. Monitoring software is developed by c++ language, and used for data receiving, parsing and real-time analyzing through calling commercial finite element software OrcaFlex by OrcaFlex API, thus finally visually outputting pipeline information such as stress, strain, TDP, etc., giving the ship operation personnel safety instruction, and making decisions in time.

Keywords: pipeline installation; real-time analyzing; devices; monitoring software

海上铺管作业是通过铺管设备,如张紧器和托管架(或 J-lay 塔)等,将管道准确铺设到位于海底的预定管道路由上的一项长期而连续的海上施工过程。在铺管作业过程中,管道在水下形态无法直观看到,只有通过数值仿真或通过声学设备等进行物理监测,来保证几千米长的管道的安全,以及管道触地点控制在设计海管路由廊宽范围内。

国内外针对铺管过程的数值仿真研究开展的工作比较多,如:针对数值模型的各类优化研究,S 型铺管

收稿日期:2017-02-21

基金项目:“十三五”国家科技重大专项课题资助项目(2016ZX05028006-005)

作者简介:高 爽(1984-),女,吉林长春人,硕士研究生,主要从事海洋工程海管结构研究与设计工作。E-mail: sgao@cotecinc.com

通信作者:王法承。E-mail: wangfacheng@tsinghua.edu.cn

托管架-船体-管线之间的耦合作用分析^[1-3];水深、管材、张紧器张力等参数对海底管道 S 型铺设影响的敏感性分析^[4-7];波浪、流等环境荷载的理论方法研究及保证海底管道安全铺设的天气窗口分析^[8-9]等。传统理论分析方法基于各类理论公式及理想假设进行数值模拟,见图 1。为保证铺管过程的安全进行,通常采用较为保守的设计结果,由此将会增加停机时间以及安装期管道疲劳损伤等。

国外几艘较为先进的铺管船均已配备有铺管作业实时安全系统,用于提高铺管作业安全性以及为动力定位系统操作人员提供支持等。如:Acergy 公司的 Falcon 安装了一套包括声学多普勒海流分析仪的铺管作业实时监测系统^[10]。Saipem 公司的 Saipem7000 安装了动力定位/管道集成系统和 Topas 系统,可以向操作人员提供管道着地点数据,参考管道路由优化船舶位置,降低管道应力,避免因 ROV 失效而引起作业中断^[11]。Allseas 公司的 Solitaire 安装配备 MCS Kenny 公司开发的 OptiLay 实时监测软件,OptiLay 计算内核基于 PipeLay 铺管安装软件^[12]。

国内针对铺管实时监测研究以验证性研究为多,通过传感器测量获得角度信息或压力信息等,与数值仿真模型相互验证,目前没有实际项目应用的监测系统。岳前进在国家 863 课题“深水海底管道铺设托管架设计及专用设备国产化技术研究”资助项目中,提出了深水管道 S 型铺设监测方案,通过监测托管架角度、张紧器拉力等与数值仿真结果、模型试验结果和第三方设计结果对比分析,验证了监测方案的可行性^[13]。洪非提出在现场将托管架、张紧器等结构的铺设状态参数与铺设水深等参量作为监测信息,由监测信息直接或间接地计算垂弯段管道的轴力、弯矩等力学参数的原型监测方案^[14]。基于惯性测量单元,唐立志提出了适用于海底管道形变监控系统的设计思想,给出了样机的机械结构、单元选取、数据采集等模块的设计原理,并对样机进行了实验验证^[15]。对于构建海上环境立体监测数据管理系统的研究开展也比较广泛,张洪智开发和设计了基于 MATLAB GUI 及 SQL Server 的铺管船作业环境监测管理信息系统^[16]。裴红英通过对铺管作业海况、船舶运动姿态、水下流速剖面等测量数据进行实时立体监测,形成统一的数据管理信息系统^[17]。

综上,基于对铺管作业过程中管道的受力状态安全辅助监测的目的,开发了一套通过实时采集环境数据、船舶运动数据、张紧器数据等,集成有限元算法,实现分析、监测、预报警、数据存储管理等功能的可视化实时分析系统,命名为“铺管安全辅助系统”。实时分析系统与传统理论分析方法对比见图 1。此系统对于减少作业停机时间,提高作业效率,节约成本,确保施工安全具有重要意义。

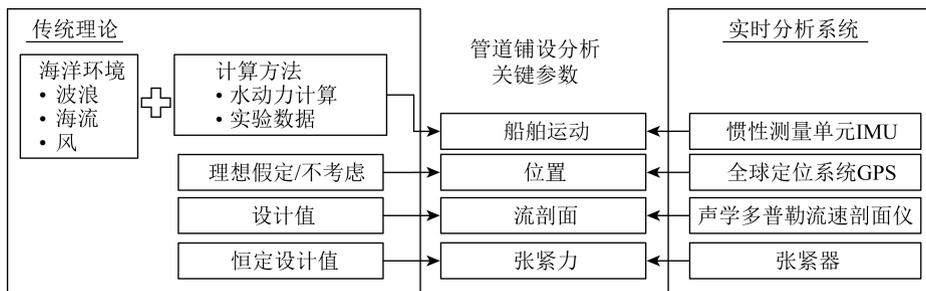


图 1 实时分析系统与传统理论分析方法对比

Fig. 1 Schematic of real-time analysis system compared with the traditional theoretical analysis method

1 铺管安全辅助系统设计方案

铺管安全辅助系统包括设备系统和二维监控软件,见图 2。系统通过数据库对硬件设备输出的原始数据,如水深、剖面流速、风速、船舶位置、航向、横摇、纵摇等集中存储、管理和共享,并将剖面流速、船舶 6 自由度时程、张紧力等实时数据解析、分包,通过调用 OrcFxAPI.dll 驱动 OrcaFlex 作为系统内核进行管道铺设工况的动态有限元计算,管道应力、应变、着泥点等结果信息入库并多界面实时共享。传感器与监测软件系统数据交换链路通畅即为在线模式,系统各项输出为真实环境的实时反馈。系统离线模式采用人工输入代替传感器数据的方式控制计算。

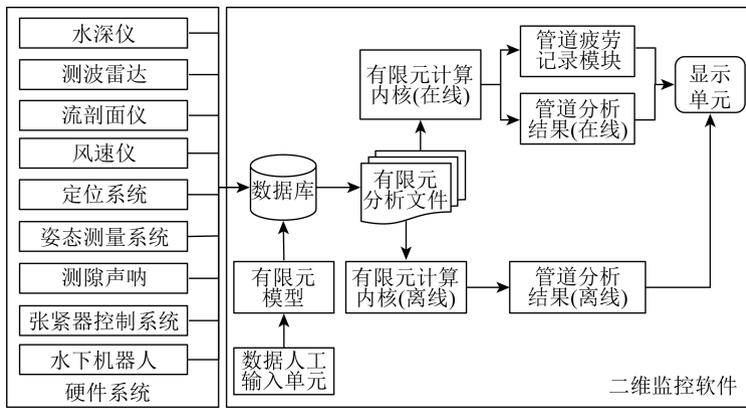


图 2 铺管安全辅助系统组成

Fig. 2 Real-time pipeline installation monitor

1.1 设备系统

铺管安全辅助系统分析计算需要 5 类基本参数的输入包括:1、环境参数;2、船舶参数;3、托管架参数;4、张紧器参数;5、管道参数。设备系统提供实时数据源,与监测软件通过以太网或者串口进行数据传输,当传输故障时,系统提供人工输入。分析数据与设备对应见表 1。根据数据源重要程度,优先配置船舶位置及姿态测量设备以及测流剖面设备^[18-19],如表 1 中数据所示。铺管分析中,张紧器对管道船端为固定约束,波浪和风的作用主要作用于船体,其作用可通过船舶的运动直接输入计算模型,因此波浪和风数据仅做参考记录。

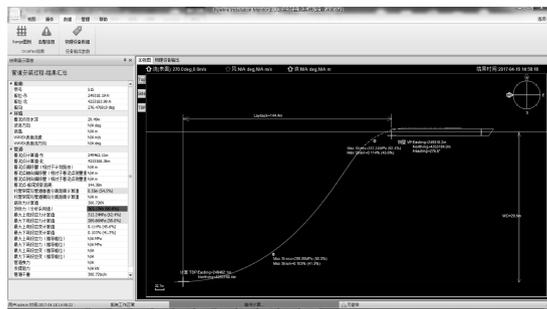
表 1 设备配置

Tab. 1 Hardware configuration

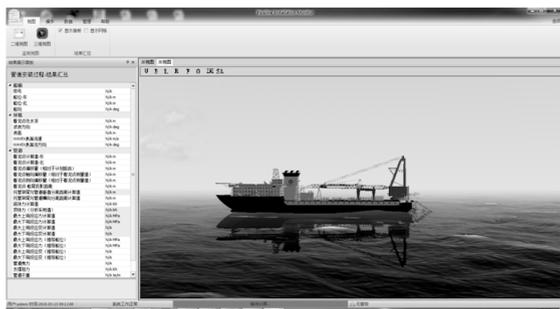
类别	数据	设备来源	接口类型	备注
	路由海床	设计基础		
	水深	Echo Sounder	串行/以太网	
环境参数	波浪(波高、周期、浪向等)	WAVEX Radar	串行/以太网	仅记录
	流剖面(流速-水深)	ADCP	串行/以太网	实时频率≥1Hz
	风(风速)	Wind Sensor	串行/以太网	仅记录
船舶参数	位置和航向	DP 或 GPS 或 GNSS/INS ^[20]	串行/以太网	实时频率≥1Hz
	姿态(横摇、纵摇、升沉)	MRU 或 GNSS/INS	串行/以太网	实时频率≥1Hz
托管架参数	铺管半径等	设计基础		
	托管架尖端空隙	Sonar	串行/以太网	仅记录
张紧器参数	顶张力	张紧器监控系统	串行/以太网	实时频率≥1Hz
管道参数	触地坐标	ROV		仅记录

1.2 二维/三维监控软件

二维监控软件采用 C/S 架构,使用 C++语言和 MFC 界面库^[21-22]开发,其中数据处理中心作为服务端,用于数据接收、解析以及计算,监控软件作为客户端,用于原始数据及计算结果数据的展示。三维监控场景对动态海洋、船只和管道进行监控和效果展示。船只和管道的动态数据通过外部传感器进行控制。其主界面软件的设计如图 3 所示。



(a) 铺管安全辅助系统二维主界面



(b) 铺管安全辅助系统三维主界面

图 3 铺管安全辅助系统二维和三维主界面

Fig. 3 2D and 3D main interfaces of real-time pipeline installation monitor

数据采集可采用无线网络传输、布设数据采集线等方式将数据汇集到数据处理中心服务器。数据处理中心软件作为一个服务端软件,负责传感器数据的分包、组包及解析工作,以及 OrcaFlex 模型建立和模拟计算等任务,其主要处理流程如图 4 所示。

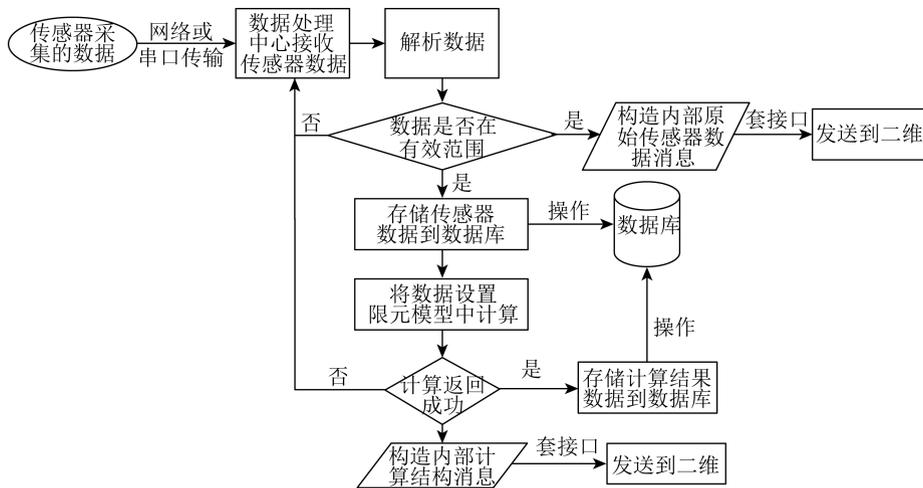


图 4 数据处理流程

Fig. 4 Data processing flow chart

2 海上测试与设计值验证

2.1 项目概况

项目场地位于渤海湾东北部海岸,距离塘沽 225 km,距离大连 136 km,水深 29 m。该项目包含一条 24" 海底混输管道和一条 16" 海底注水管道。铺管船为海洋石油 202 船,新建海底管道信息见表 2。

表 2 管道信息

Tab. 2 Pipeline information

管道类型 编号	管道名称	长度/km	单层管规格			混凝土配重		
			外径 /mm	平管壁厚 /mm	立管壁厚 /mm	钢级 API 5L (PSL 2)	密度 /(kg · m ⁻³)	厚度 /mm
混输 1	WHP-J—RUP	1.9	609.6	20.6	27.0	X65 UOE	2950	60
注水 2	RUP—WHP-J	1.9	406.4	12.7	14.3	X65 HFW	2950	60

甲板上存储管道的长度需满足模拟周期内下放管道的长度,管端连接 winch 单元,用于模拟张紧器提供的恒张力为 37 t,见图 5。

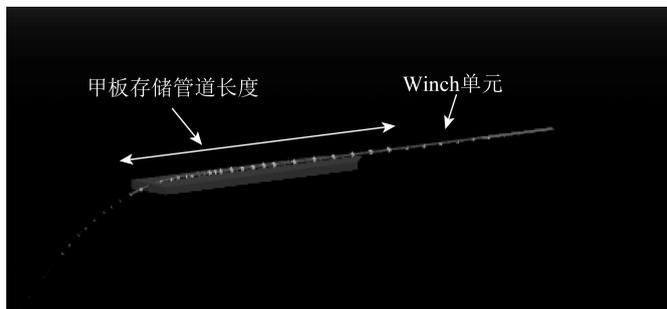


图 5 OrcaFlex 模型

Fig. 5 OrcaFlex model

GNSS/IMU 组合惯性导航系统采集船舶位置、航向及姿态时程按 1Hz 频率输入系统内,船舶横摇、纵摇、升沉历史时程数据见图 6。

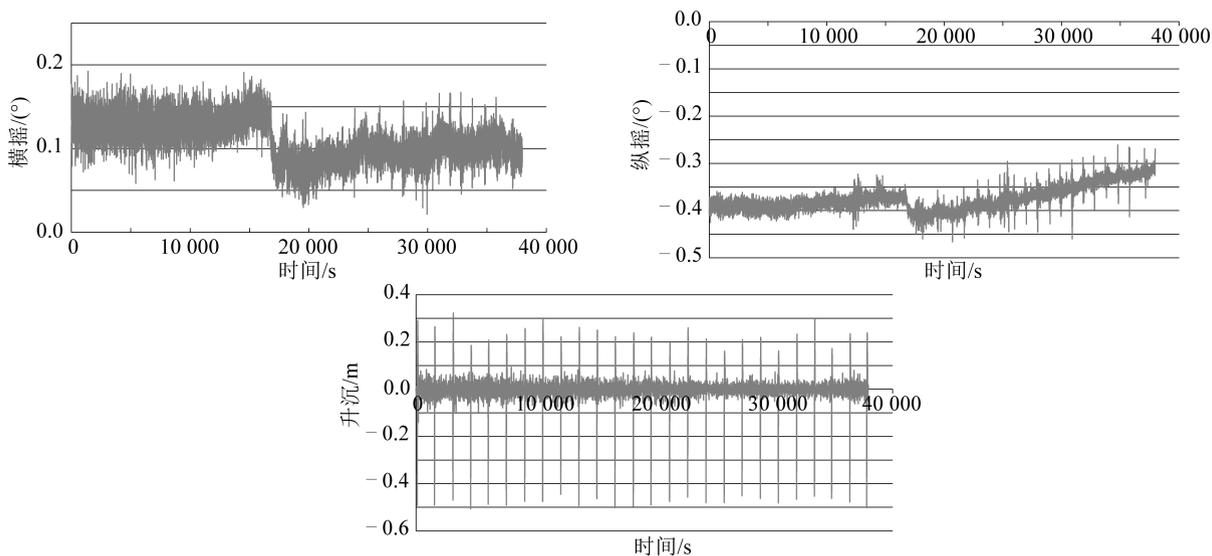


图 6 船舶姿态时程曲线

Fig. 6 Vessel attitude time history curve

2.2 告警参数设置及告警界面

告警参数包括:托管架尖端间隙、顶张力、管道上/下弯段应力、管道上/下弯段应变。当实时分析值超过黄色预警或红色预警区间,相应结果会以黄色或红色高亮闪烁提示。实例各变量极限值、黄色预警值占极限值比率及红色预警值占极限值比率设置见表 3。代表性告警结果瞬时界面见图 3(a)。

表 3 告警参数设置

Tab. 3 Alarm parameter setting

报警变量	极限值	黄色预警区间	红色预警区间
管道与托管架尾端间隙/m	1	0.5	0.9
顶张力/kN	362	0.5	0.9
上弯段最大应力/MPa	448	0.5	0.9
下弯段最大应力/MPa	448	0.5	0.9
上弯段最大应变/(%)	0.25	0.5	0.9
下弯段最大应变/(%)	0.25	0.5	0.9

2.3 系统实时结果与静态值对比

表 4 为 16" 管道正常铺设静态值结果汇总,项目实际张力采用工况 2 的 37 t。根据船舶位置和姿态时程,经过动态分析,代表性输出结果瞬时界面见图 3(a)。系统所采用的各项管道参数及托管架辊轮参数均与设计值一致,上弯段 Mises 应力对比见图 7。上弯段系统静态应力为 309 MPa;设计阶段通过将静态应力乘以 1.3 倍动力放大系数保守考虑铺管动态响应,上弯段静态应力为 302 MPa,动态应力为 392.6 MPa。系统静态应力与约 10 小时实时输出值历史数据时程对比见图 8,在统计时间内出现最大上弯段动态应力为 320 MPa,为静态应力的 1.06 倍,小于设计动力放大系数 1.3。

表 4 正常铺设设计值结果

Tab. 4 Normal laying design data

工况	船			托管架		最大 Mises 应力(%SMYS)	
	张力/t	最大滚轮 /t	角度/(°)	最大滚轮 /t	上弯段 / (%)	托管架尾端 间距/(%)	下弯段 / (%)
1	30	7.4	13	6.3	65.86	51.69	69.02
2	37	7.7	13	5.2	67.29	35.60	59.18
3	44	8.0	13	5.4	68.71	21.41	51.76

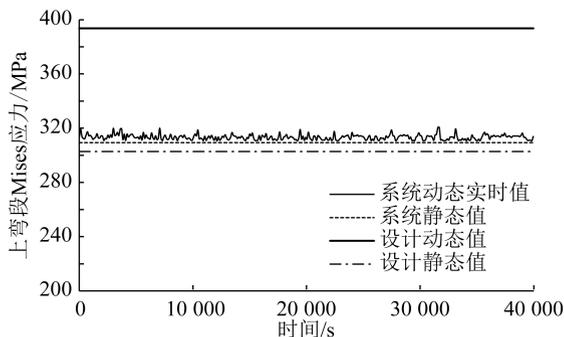
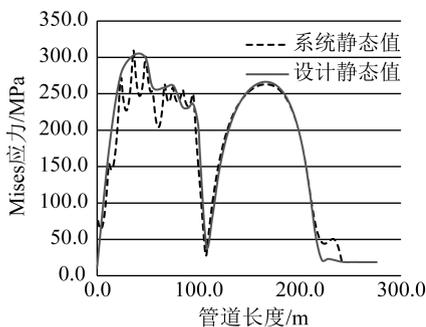


图 7 管道静态 Mises 应力:系统值与设计值对比

图 8 管道 Mises 应力历史时程与设计值对比

Fig. 7 Static Mises stress: system value vs. design value

Fig. 8 Real time Mises stress vs. design value

根据张紧器张力、水深、管道参数、船舶运动实时数据等依据悬链线理论求解管道瞬时 S 型态,结合 GNSS/INS 获得的实时船舶位置,推算出着泥点位置结果,实时求解数据与后调查结果对比见图 9。实时推算位置与后调查位置偏差在 2 米以内。

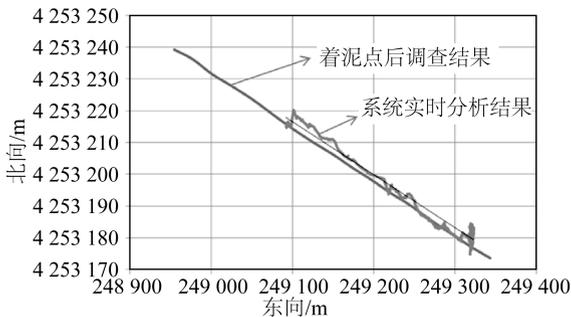


图 9 着泥点后调查结果与实时分析结果对比

Fig. 9 Real time TDP result vs. post survey result

3 结 语

铺管安全辅助系统是组合惯性导航领域、高性能计算机领域以及有限元三维仿真领域的集成性创新。系统基于实测环境数据及船舶姿态数据,尤其船舶 6 自由度姿态数据是真实环境的动态响应,作为模型计算的输入,可以更准确地输出当前环境的管道响应。相比传统设计分析所使用的波浪理论及概率理论等,能有效降低设计阶段的保守性,同时减少作业停机时间,提高作业效率,节约成本。工程实际中出现过施工海域海况很难满足设计气候窗的情况,直接影响施工效率,同样长时间待机会增加安装期管道疲劳损伤,如果能够将实时海况进行现场模拟,在一定程度上可以拓宽气候窗,降低工程成本,减少管道疲劳损伤。系统可以通过设置安装参数警戒值,例如,管道应力警戒值等,通过系统分析实时反馈安装状态,给予船上作业人员安全指导,及时作出决策。

铺管安全辅助系统研发基于商业通用有限元软件 OrcaFlex 作为计算内核,其灵活的建模功能,使该系统具有广阔的拓展空间,可以推广为管道碰撞监测、横向弯曲监测以及管道起始安装监测、弃管/回收监测、吊装监测等。

参考文献:

- [1] 宋林峰, 孙丽萍, 王德军. 深水 S 型铺管托管架-船体-管线耦合分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(4): 415-433. (SONG Linfeng, SUN Liping, WANG Dejun. Coupling analysis of stinger-lay barge-pipeline of S-lay installation in deep water [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(4): 415-433. (in Chinese))
- [2] SILVA L D, LIMA H M, JACOB B P. Pipeline-lay barge interaction model for the simulation model for the simulation of S-lay installation procedures [C]//Proceedings of 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Estoril, Portugal, 2008: 58487.
- [3] MARTINEZ C E. Laying modeling of submarine pipelines using contact elements into a corotaional formulation[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering Copyright, 2003, 125: 145-152.
- [4] 高爽, 孟祥伟, 孙友义, 等. 海洋石油 201 水下管汇在线安装极限能力评估[J]. 石油矿场机械, 2016, 45(5): 1-7. (GAO Shuang, MENG Xiangwei, SUN Youyi, et al. HYSY 201 work capacity assessments on in-line manifold installation[J]. Oil Field Equipment, 2016, 45(5): 1-7. (in Chinese))
- [5] 周巍伟, 张恩勇, 曹静. 深水海底管道 S 型铺设影响因素分析[J]. 中国海上油气, 2016, 28(2): 148-150. (ZHOU Weiwei, ZHANG Enyong, CAO Jing. Analysis of factors influencing deep water submarine pipeline S-lay operations[J], 2016, 28(2): 148-150. (in Chinese))
- [6] 龚顺风, 何勇, 周俊等. 深水海底管道 S 型铺设参数敏感性分析[J]. 海洋工程, 2009, 27(4): 87-95. (GONG Shunfeng, HE Yong, ZHOU Jun, et al. Parameter sensitivity analysis of S-lay technique for deepwater submarine pipeline[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(4): 87-95. (in Chinese))
- [7] Facheng Wang, Yong Luo, Yi Xie, et al. Practical and Theoretical Assessments of Subsea Installation Capacity for HYSY 201 Laybarge According to Recent Project Performances in South China Sea [C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 5-8 May 2014.
- [8] 康庄, 张立, 张翔. 深水钢悬链立管铺设安装作业窗口分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(1): 110-122. (KANG Zhuang, ZHANG Li, ZHANG Xiang. Analysis of operability envelopes for pipe laying of deepwater steel catenary risers[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(1): 110-122. (in Chinese))
- [9] 叶茂, 段梦兰, 徐崇崑, 等. J 形铺设过程管道动态分析与研究[J]. 石油机械, 2013, 41(6): 43-48. (YE Mao, DUAN Menglan, XU Chongwei, et al. Dynamic analysis and study of J-shaped pipeline-laying process[J]. 2013, 41(6): 43-48. (in Chinese))
- [10] JOAKIM TABY, EGIL GIERTSEN, MELVYN MORGAN, et al. On-board monitoring, analysis and decision support during offshore pipe lay operation [C]//Offshore and Arctic Engineering. Rotterdam, The Netherlands. June 19-24, 2011.
- [11] ROBERTO FALDINI, STEFANO MARCHINI, ANDREA OLDANI, et al. CastorOne and FDS 2: Getting stronger for laying deeper [C] // Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA, 5-8 May 2014.
- [12] OPTILAY On-board installation planning and monitoring software [online]. <http://www.mcskenny.com/images/software/OPL%201pg%202015%20Rev.%202.pdf>
- [13] 岳前进, 张向锋, 张文首, 等. 深水管道 S 型铺设监测研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 119-124. (YUE Qianjin,

- ZHANG Xiangfeng, ZHANG Wenshou, et al. Monitoring of deep sea S-lay[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(4): 119-124. (in Chinese))
- [14] 洪非, 武文华, 杜宇, 等. 深水铺管垂弯段屈曲状态的原型监测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(10): 2 018-2 024. (HONG Fei, WU Wen-hua, DU Yu, et al. Prototype monitoring research of bucking state made of segbend section for deepwater S-lay installation[J]. Journal of Zhejiang University, Engineering Science, 2015, 49(10): 2 018-2 024. (in Chinese))
- [15] 唐立志, 高睿, 黄诚, 等. 基于惯性测量单元的海底管道铺设过程中形变监控系统研究[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(6): 96-101. (TANG Lizhi, GAO Rui, HUANG Cheng, et al. Study on the Deformation Monitoring System Based on Inertial Measurement Unit During Subsea Pipeline Laying[J]. JOURNAL OF OCEAN TECHNOLOGY, 2015, 34(6): 96-101. (in Chinese))
- [16] 张洪智. 铺管船作业环境监测管理信息系统的开发与研究[D]. 中国海洋大学, 2014. (Development and Research of Operation Environment Monitoring and Management Information System of Pipelaying[D]. Ocean University of China, 2014. (in Chinese))
- [17] 裴红英. 海洋环境监测与数据采集技术研究[J]. 石油和化工设备, 2015, (4): 50-52.
- [18] 宋政峰, 席占平. 走航式 ADCP 流量测验主要误差来源及其控制[J]. 水文, 2016, 36(1): 58-65. (SONG Zhengfeng, XI Zhanping. Main error source of underway ADCP discharge measurement and concerned control method[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(1): 58-65. (in Chinese))
- [19] 曹晓磊, 赵胜凯, 李占强. 走航式 ADCP 在水文测验中的应用研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(01): 35-37. (CAO Xiaolei, ZH AO Shengkai, LI Zhanqiang. Application of vessel-mounted ADCP in hydrological measurement [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(01): 35-37. (in Chinese))
- [20] 程龙, 周海渊, 吴旭贤, 等. 航天测量船组合导航系统在某型号测控任务中的应用[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(12): 2 902-2 906, 2 922. (CHENG Long, ZHOU Hai-yuan, WU Xu-xian, et al. Application of INS/ESGM/GNSS integrated navigation system of ST&C ship in one model ST&C task[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(12): 2 902-2 906, 2 922. (in Chinese))
- [21] 雷浩然, 陈帅. 基于 MFC 的组合导航监测软件快速实现方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 262-264. (LEI Haoran, CHEN Shuai. Rapid implementation method of monitoring software for integrated navigation based on MFC [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(S1): 262-264. (in Chinese))
- [22] 张海洋. 船载天线串口数据采集系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(1): 150-154. (ZHANG Haiyang. Design and implementation of serial data acquisition system for ship antenna[J]. Computer Technology and Dvelopment, 2016, 26(1): 150-154. (in Chinese))