

黑龙江省精品图书出版工程项目

深水起重铺管作业 动力学分析与视景仿真

SHENSHUI QIZHONG PUGUAN ZUOYE
DONGLIXUE FENXI YU SHIJING FANGZHEN

王立权 李志刚 许元革 李震 许秀军 著



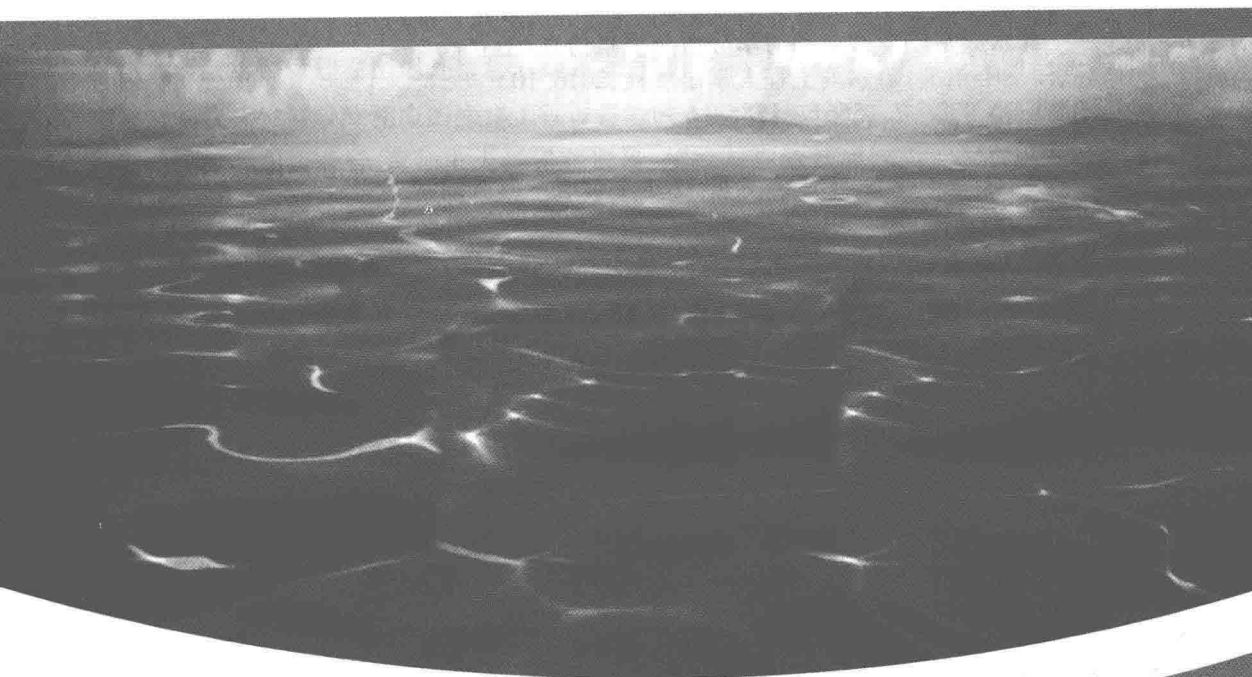
HEUP 哈尔滨工程大学出版社

黑

深水起重铺管作业 动力学分析与视景仿真

SHENSHUI QIZHONG PUGUAN ZUOYE
DONGLIXUE FENXI YU SHIJING FANGZHEN

王立权 李志刚 许元革 李震 许秀军 著



内 容 简 介

本书阐述了基于海上起重、管道铺设作业工程的实际应用,建立了作业动力学模型,并在此基础上,利用虚拟仿真技术构建仿真模拟系统,实现工程预演和人员培训的全过程。本书还较详尽地介绍了针对海上起重、铺管作业实际工程开发仿真案例的过程。通过仿真案例,有效地实现并验证了本仿真系统的可用性。全书的内容主要包括环境载荷模型构建、海上起重作业动力学模型构建、铺管作业动力学模型构建、仿真系统总体架构、起重作业仿真系统开发与案例展示、铺管作业仿真系统开发与案例展示等。本书针对动力学模型分析构建有比较详细的介绍,针对构建过程的主要思路和内容以及对应的关键技术进行了介绍和说明。对于初学者而言,有一定难度(例如整体软件架构的搭建和系统通信接口建立),读者可以通过对本书的学习,找到类似问题的解决思路和方案。

本书不仅可以作为海上起重作业、海底管道铺设仿真系统领域科研人员的参考书,对于虚拟游戏、战场模拟、虚拟制造、矿井开采模拟、房地产开发模拟、旅游景点虚拟漫游系统等其他相关领域而言,也具有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

深水起重铺管作业动力学分析与视景仿真/王立权
等著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2016. 10
ISBN 978 - 7 - 5661 - 1385 - 6

I. ①深… II. ①王… III. ①水下管道 - 海底铺管 -
研究 IV. ①P756. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 257036 号

选题策划 卢尚坤
责任编辑 张忠远 马中月
封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 16.5
字 数 430 千字
版 次 2016 年 10 月第 1 版
印 次 2016 年 10 月第 1 次印刷
定 价 49.80 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

进入 21 世纪,海洋逐渐成为全球石油勘探的重要领域,据国外权威机构预测,未来世界油气总储量的 44% 将来自海洋。目前,世界深水探明油气储量达 440 亿桶油当量,待发现深水油气资源量超过 1 000 亿桶油当量。中国近海海域累计探明石油地质储量 24.1 亿吨,可采储量 5.13 亿吨,剩余可采储量 2.83 亿吨。超过 80% 的石油储量分布在渤海盆地。

世界范围内的深海石油勘探开发热潮兴起于 20 世纪 80 年代末,虽然至今仅有 30 多年历史,但技术创新层出不穷,海洋油气勘探开发突飞猛进,作业水深纪录不断刷新。20 世纪 70 年代,世界海洋油气勘探开发作业水深低于 200 m。目前,最大勘探作业水深已超过 3 000 m,开采作业水深已超过 2 000 m。深水 and 超深水海域的油气资源,正成为美国、英国、挪威、巴西等国竞相开发的热点,深海油气勘探开发被认为是石油工业发展的一个重要前沿阵地。在墨西哥湾、巴西海域以及西非等地,深海石油开发已经有了极大的发展。

大型起重铺管船在国内外市场上都有着良好的需求前景,海上油气,特别是深水、超深水油气的快速发展导致相应的海洋工程设备短缺。20 世纪末以来,石油工业投资不足导致新设备研发和制造滞后,再加上大批设备退役,使这一现象日益突出。作为海上油气等资源开发的主力设备,深水起重铺管船不仅制造成本高,每次作业的施工成本也非常大。如何缩短施工周期,提高施工效率,降低工程成本,提升作业安全性和可靠性,对于海洋工程作业来讲意义重大。所以,开发一套完善的起重、铺管仿真系统,实现在陆地环境中对海上工程施工进行工程预演和人员培训,就显得尤为重要。

本书由深水铺管起重船起重铺管作业仿真系统的开发而展开,并详细介绍了起重铺管作业视景仿真系统的构建与开发过程,包括数学模型的建立,以及视景系统构建、动力学系统构建、虚拟环境构建和核心软硬件系统的开发等。基于对海上真实起重铺管作业动力学过程的研究,开发出一套起重铺管作业视景仿真模拟训练系统,通过在陆地环境中对深水起重铺管作业进行仿真模拟,达到人员培训、工程过程预演等目的。

该仿真平台的搭建,有助于缩短工程开发的周期,实现工程问题的量化及结果的直观显示,帮助研发人员在工程设计阶段及时发现问题,提高方案迭代优化效率,减小实际操作的风险,避免不必要的经济损失。从人员培训角度来看,该仿真系统将先进的虚拟培训理念方式引入到复杂的海洋工程作业中,改变了传统的作业人员培训方式,缩短了培训周期,提高了培训的效率,还在一定程度上解决了训练场地单一、消耗大、设备磨损严重等问题。通过训练能达到有效提高作业效率,提升作业的安全性,提高作业人员决策的科学性等目的。

本书第 1 章介绍了铺管起重仿真系统研究背景的目的和意义,并对相关技术的发展状况进行了说明。第 2 章介绍了仿真系统总体搭建方案。第 3 章阐述了环境系统的构建。后

续章节对起重铺管作业过程中数学模型系统的构建和仿真系统开发的关键技术进行了详细介绍,最后结合已有的工程项目开发出仿真案例,对仿真系统的功能进行了较详尽的描述,同时也对仿真结果进行了分析和验证。

本书由王立权、李震组织编写并共同定稿,参加本书编著的还有倪宝成、张同喜、方圆、李想、孟凡森、李琳杰、姚广旭、李雪冰、庄严、王孟岩、班帅、曹亚楠、刘冲、田庆元、张景玲、王明月、王玉凤等。撰写过程中得到了海洋石油工程股份有限公司有关专家、领导的大力支持,在此一并感谢。

限于作者的知识水平和经验,书中错误和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

著 者

2016 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 研究背景、目的及意义	3
1.3 深水铺管起重船概述	5
1.4 海上铺管起重技术简介	8
1.5 虚拟现实技术及其在海洋工程中的应用	16
第 2 章 环境载荷和虚拟环境构建	19
2.1 环境外部载荷系统	19
2.2 虚拟环境模型系统	27
第 3 章 起重作业动力学模型构建	44
3.1 概述	44
3.2 起重船起重作业系统数学模型	44
3.3 吊索运动数学模型	46
3.4 压载数学模型	50
第 4 章 铺管作业动力学模型构建	52
4.1 概述	52
4.2 铺管船铺管作业坐标系	52
4.3 S 型管道初始铺设静态数学模型	57
4.4 S 型管道正常铺设静态数学模型	65
4.5 收弃管作业静态数学模型	69
4.6 铺管铺设动态数学模型	71
4.7 铺管规范安全检测	75
第 5 章 深水铺管起重作业视景仿真系统总体方案	77
5.1 概述	77
5.2 基于 HLA 架构的视景仿真系统介绍	77
5.3 视景仿真系统开发工具	79
5.4 视景仿真系统功能需求	80
5.5 视景仿真系统硬件总体方案	81
5.6 视景仿真系统软件总体方案	84
5.7 视景仿真系统总体布置	86
第 6 章 起重作业仿真系统开发	103
6.1 概述	103
6.2 仿真系统的功能及过程分析	103
6.3 视景仿真系统的结构设计	105
6.4 起重作业视景仿真系统可视化模块的设计与开发	108

6.5	起重仿真系统软件的开发与集成	112
6.6	起重船半实物仿真系统展示	113
第7章	起重作业仿真案例开发	117
7.1	组块吊装作业仿真算例	117
7.2	300 t 钢桩安装作业仿真算例	139
第8章	铺管作业仿真系统关键技术	147
8.1	铺管仿真系统集成	147
8.2	数据的采集与处理	152
8.3	张紧器子系统数据通信的实现	159
第9章	铺管作业仿真系统开发	164
9.1	铺管仿真系统组成	164
9.2	铺管仿真系统开发	167
9.3	铺管视景仿真系统可视化模块的设计与开发	169
9.4	铺管仿真系统软件的开发与集成	178
9.5	张紧器子系统开发	185
第10章	铺管作业仿真案例开发	195
10.1	概述	195
10.2	静态铺设管线形态及张紧器张力预测	195
10.3	初始铺管作业案例分析	201
10.4	正常铺管作业仿真算例	227
10.5	张紧器子系统测试	240
参考文献		249

第1章 绪 论

1.1 概 述

21 世纪,能源问题已经成为制约世界经济发展的重大瓶颈,其中被称为“工业血液”的石油同样面临着枯竭的危险。经过多年的开采,陆上石油可开采量已经迅速减少,于是各国都将目光放到了海底石油。据地理学家预测^[1-3],海洋蕴藏了全球 70% 以上的油气资源,全球深水区潜在石油储量高达 1 000 亿桶,深水是世界油气的重要接替区。我国南海的深水海域蕴藏着丰富的油气资源。勘探结果表明,海南岛周围形成了北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地和珠江口盆地 4 个储油气构造,发现新生代油气沉积盆地或盆地群 39 个,预测石油储量约 400 亿吨,天然气储量约 150 000 亿立方米^[4],被誉为第二个“中东”。

作为发展中的经济大国,中国的石油消费量逐渐攀升。自 1993 年中国成为原油净进口国以来,原油进口依存度不断提高。2007 年原油净进口超过 1.63 亿吨,原油进口依存度高达 46.05%,成为世界上继美国之后第二大石油消费国。据专家预测,到 2020 年,我国石油消费将达 5.5 亿~6.1 亿吨,缺口达 2.5 亿~4.3 亿吨。由于国内石油产量不可能大幅增长,今后新增的石油需求几乎全部依赖进口。有专家预测,到 2020 年左右,中国石油进口量有可能超过 3 亿吨,成为世界第一大油品进口国,石油供应对外依存度将达到 55.8%~62.1%^[5-7]。由此可见,中国的石油危机比其他国家都要严重,开发海底石油成为事关中国未来经济能否持续发展的关键。

随着我国对海洋石油开发的不断深入,深海石油开发大型装备的需求也在不断增加,这也对大型装备制造工程提出了新的挑战,需要对深海乃至极深海的工程作业装备进行更深入的研究。虽然我国在深水开发方面已经迈出了可喜的一步,但目前还不具备自主的深水技术和能力,与国外先进技术存在巨大的差距。为了加快推进南海深水油气田的勘探开发进程,中国海洋石油总公司投资委员会已批准在“十一五”期间建造深水铺管起重船和深水半潜式钻井平台等大型深海工程用装备,成立了项目组和专职研究机构,并加大科技投入以开展有关技术研发工作^[8-11]。“十一五”规划成功完成,目前各种深海大型工程装备相继问世。

2011 年 5 月 23 日,我国海洋工程装备制造标志性工程、国家科技重大专项标志性装备之一的 3 000 m 深水半潜式钻井平台“海洋石油 981”,在上海举行成果汇报会暨命名仪式,这标志着由中国海洋石油总公司和中船集团共同携手打造的当今世界上最先进的第六代深水半潜式钻井平台即将投入使用。2012 年 5 月 9 日,“海洋石油 981”^[12-17](图 1-1)在南海海域正式开钻,是中国石油公司首次独立进行深水油气的勘探,标志着中国海洋石油工业的深水战略迈出了实质性的步伐。“海洋石油 981”是我国首座自主设计、建造的第六代深水半潜式钻井平台,最大作业水深 3 000 m,钻井深度可达 12 000 m,平台自重超过 3 万吨;从船底到钻井架顶高度为 136 m,相当于 45 层楼高。“海洋石油 981”的建成,填补了我国在深水钻井大型装备上的空白,使我国深水油气资源的勘探开发能力和大型海洋装备

建造水平跨入世界先进行列。长期以来,受技术水平和装备能力所限,我国海洋石油开发只能在 500 m 水深以内的近海进行。“十一五”期间,中国海洋石油总公司大力推动深水发展战略,斥巨资打造包括深水半潜式钻井平台、深水铺管起重船在内的一批大型深水工程装备,对于加速进军深海海洋工程装备开发、提升深水作业能力、实现国家能源战略、维护国家权益等都具有重要的战略意义。深水半潜式钻井平台“海洋石油 981”的命名和建成,标志着我国在海洋工程装备领域已经具备了自主研发能力和国际竞争能力。



图 1-1 “海洋石油 981”深水半潜式钻井平台

2011 年 7 月 23 日,由广州广船国际股份有限公司与广州中船黄埔造船有限公司合作建造的,亚洲最大、世界领先的 5 万吨半潜船 2 号船——“祥瑞口号”(图 1-2)也顺利交付船东,即日投入运营。该型船是中远航运股份有限公司为满足全球深海油田开发和建设运输需求而量身定造的特种船舶,采用了目前世界上最先进的电力推进、数字化操控等技术,具有自动化程度极高、设计难度大、结构复杂、建造要求高及建造计划性强等特点,标志着我国海洋工程运输技术方面已处于世界领先水平。



图 1-2 “祥瑞口号”半潜船

2012年5月15日,我国首艘深水铺管起重船“海洋石油 201”^[18-19](图 1-3)建造竣工,起航仪式在青岛举行。与“海洋石油 981”主要用于南海深水油气田的钻井、完井和修井作业不同,“海洋石油 201”承担着深水油气田海上生产设施建设的重任,能够从事固定式、浮式和水下油气生产设施安装以及海底管道铺设^[20]等全方位海上施工作业,该船设计、建造和施工关键技术被列入“十一五”国家科技重大专项和国家“863”重点计划。



图 1-3 “海洋石油 201”深水铺管起重船

“海洋石油 201”是世界上第一艘同时具备 3 000 m 级深水铺管能力、4 000 t 级重型起重能力和 DP-3 级动力定位能力的船型深水铺管起重船,能在除北极外的全球无限航区作业。“海洋石油 201”的详细设计和建造在国内自主完成,总体技术水平和综合作业能力在国际同类工程船舶中处于领先地位,建造成本和工期与国际上类似规模的船舶相比,处于工程费用最少、工期最短的前列,代表了国际海洋工程装备制造的最高水平,并将填补中国在海洋工程深水装备领域的空白。

1.2 研究背景、目的及意义

1.2.1 研究背景

深水铺管起重船“海洋石油 201”是中国海洋石油总公司实施深水发展战略的重要装备,既是海洋石油工程股份有限公司(海油工程)承担的国家 863 计划“南海深水油气勘探开发关键技术及装备”重大课题“深水海底管道铺设技术”的依托课题,也是中国海洋石油总公司承担的 16 个国家科技重大专项之一的“大型油气田及煤层气开发”中“海洋深水工程重大装备及配套工程技术”的重要组成部分。该船由荷兰 GUSTO 公司进行船型设计,国内船舶设计公司自主进行详细设计。采用了包括全电力推进、DP-3 动力定位、4 000 t 重型海洋工程起重机、S 型深水铺管系统等一系列国际上最先进的技术和装备,为我国首条 DP-3 动力定位双层甲板自航深水铺管起重船。建成后将结束我国没有 DP-3 动力定位工程船舶的历史,结合“863”计划课题和科技重大专项的实施,将形成具有自主知识产权的深水海底管道铺设技术,并填补了国内空白。

深水起重、铺管作业是技术形态较复杂的海洋工程项目,除了涵盖常规起重作业的技

术特点外,还具有特殊的性能和要求。其作业难度和特殊性具体体现为以下几个方面。

(1)在极短时间内起吊数千吨重物,即在短时间内船舶排水量急剧增加数千吨之多。

(2)按规范,起吊重物的重心要算在吊钩以上的滑轮心轴上,该点距水面数十米,甚至上百米,使全船的重心一下提高很多,对船舶稳性极其不利。

(3)起重重物的重量与吊幅的乘积产生巨大的倾覆力矩,对浮态产生很大影响(而且是在数分钟内发生),静横倾角可能达到 $7^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 甚至更大。为了使船舶处于安全浮态,必须在反向加载大量压载水以部分抵消起吊重物产生的横倾力矩,这样一来,船舶的排水量及吃水再度增加。

(4)回转起重机在船的两舷带载回转时,巨大的倾覆力矩在短时间内反向,原来的压载水也必须迅速地反向调载,否则会造成船舶倾斜加剧,并使回转机构处于下坡运转状态,这是非常危险的。为了迅速地调载,大起重船的压载泵容量都比较大。

(5)海上动态复杂多变的风、浪、流环境会时刻干扰铺管作业的进行,造成管道发生屈曲,稍有不慎会导致铺管作业的失败,不仅会延长施工周期,还大大增加了施工成本。

(6)复杂多变的海底地貌环境,同样对管道的正常铺设有巨大的影响,所以如何将预制的海底管道安全准确地放到设定的路由轨迹范围内,是一个非常困难复杂的工程。

全回转起重作业过程是一个庞大复杂的系统工程,成本极高,而作业环境又非常复杂,这使得起重船因受外力的运动变得不可预见。为了保证作业顺利进行,需要实时监测全回转起重船的运动情况,并进行一定分析后将其可视化,供操作人员判断、抉择。起重机起吊重物全回转过程的船舶实时浮态与稳性的计算及显示,已达到作业前预配载,并快速找到最佳配载方案;作业中实时监测船舶作业浮态与稳性变化,保证作业的安全可靠的两个目标,具有较强的工程应用价值。

海上起重和铺管作业都是极其复杂的多系统协同过程,利用先进的虚拟仿真技术构建海上起重作业视景仿真培训模拟系统,不仅能够满足海上起重作业人员培训、方案预演等功能,一定程度上解决实船训练高风险、耗资巨大等问题,而且能起到显著提高作业效率和提升作业安全性等目的。

目前,“十一五”相关深海工程大型装备相继问世。为了更加完善“十一五”国家重大科技专项“深水铺管起重船作业视景仿真技术研究”的研究成果,本课题以“十二五”国家重大科技专项“深水铺管起重船及配套工程技术”为依据,在改善起重作业仿真模拟系统的同时重点构建了实时铺管作业仿真模拟系统。

1.2.2 课题研究的目的及意义

1. 目的

深水铺管作业是深水铺管起重船的主要功能之一。深水铺管作业是一个十分复杂的过程。因为在恶劣的海洋环境下,不但要确保深水铺管起重船动力定位系统和铺管作业线等多个系统间能协调而高效地工作,同时还必须确保所铺设管道的安全性和完整性。

海上起重作业是深水铺管起重船另一项主要功能。海上起重作业,尤其是恶劣海况、大载荷下的起重作业是一项非常复杂的过程,不但涉及船舶稳性变化、压载调整、碰撞干涉等问题,还涉及多个系统间的联调作业。

通过对深水铺管起重船的铺管、起重作业过程进行软件环境下的视景仿真,可以实现对铺管、起重作业所涉及的各系统关键设备工作状态和管道状态的实时监测及预测,为各系统操作人员提供及时的参考信息,从而提高铺管、起重作业的效率 and 安全性。

“深水铺管起重船作业实时仿真技术研究”课题,将在深水铺管起重船数学模型研究及工程实测数据的基础上,建立基于深水铺管、起重作业工程实践的视景仿真系统,以起到显著提升铺管、起重作业效率,提高作业安全性等目的。

2. 意义

仿真系统进行研究和开发对实际工程作业有重大现实意义,表现在以下几个方面。

(1) 提高作业安全性

通过仿真系统的模拟培训,使操作者不用实船操作就能熟练掌握铺管、起重作业操作流程,通过仿真系统不同训练科目的设定,训练指挥对作业流程掌控及应急预案的处理能力。避免了实船培训过程中由于新手对作业工艺不熟悉而导致的操作失误,增强操作人员对突发事件的处理能力,能够有效地减少作业过程中的事故发生。

(2) 经济性好

如果直接通过实船操作对培训人员进行训练,每次训练时人力、物力的消耗都比较大,而且培训的周期比较长。通过仿真系统对培训人员进行培训,可以避免这些问题,大大减少了经费的支出。此外,由于仿真系统能够提高实际工程作业的安全性,也减少了工程作业隐性的经济损失。

(3) 仿真系统功能性强

铺管起重仿真系统能够实现对海洋环境、天气环境以及环境中各种实体对象的三维仿真;通过数学模型系统实现对作业的运动学仿真;主控系统能够实现强大的人机交互功能;仿真系统通过教练员、操作者、指挥员等工位能够完成对不同种类作业人员的培训,快速提高培训人员的实船操作能力;仿真系统针对培训内容可以设定不同的训练科目;该仿真系统在硬件和软件方面都具有很强的扩展性,能够满足企业不断变化的需求。

(4) 培训效率高

铺管起重作业仿真系统可以模拟海上起重作业和四种不同的铺管作业过程,包括起始铺管、正常铺管、弃管、收管过程,在短时间内能够对学员开展有针对性的海上施工作业过程培训;仿真系统针对不同作业案例进行开发,可以完成对真实作业案例的提前预演,使操作者熟悉此次项目作业过程;仿真系统设置有应急预案,用来培训操作者对紧急情况的处理能力;强大的人机交互可以实时地修改海况、作业控制参数等,例如,提高仿真倍数,使仿真系统更灵活、高效;仿真系统设有回放功能,操作人员通过对回放记录的观看,了解自己操作过程中的错误,提高每次的培训质量,缩短培训周期。

1.3 深水铺管起重船概述

该深水铺管起重船的全称为“海洋石油 201”(图 1-4 为“海洋石油 201”的视景效果图),中国海洋石油总公司所有,是由海洋石油工程股份有限公司承担的国家“南海深水油气勘探开发关键技术及装备”重大课题“深水海底管道铺设技术”的依托项目。“海洋石油 201”采用了包括全电力推进、4 000 t 重型海洋工程起重机,S 型深水铺管,DP-3 动力定位系统等一系列国际上最先进的技术和装备。该船设计为能在除北极外全球无限航区作业,包括中国东海、南海,东南亚海域,巴西海域,墨西哥湾等石油主产区海域。总体性能符合 ABS(美国船级社)和 CCS(中国船级社)的标准。



图 1-4 “海洋石油 201”的视景效果图

1.3.1 铺管作业系统

“海洋石油 201”的铺管作业系统由 A&R 绞车、张紧器、托管架、管道传送系统及 DP 系统构成。张紧器的主要作用是在不同的工况(如放管、弃管、保持)、不同的作业环境下(如风速、海浪、洋流、海潮),提供管道恒定的夹持力。张紧器一般由压紧机构、履带机构、驱动系统、支架、张力传感系统五部分构成。按张紧方式划分为螺旋夹紧和液压马达驱动、螺旋夹紧和电机驱动、液压缸夹紧和电机驱动 3 种。

A&R 绞车又称收放绞车,由牵引绞车、储缆绞车、水平补偿滚轮、测量滑轮、导向滚轮五部分组成。最大能够承载 400 t 工作负荷。

托管架安装在船尾,用于支撑管线离开船后的上弯段。托管架为固定式,通过铰链安装在船尾,铰接点与船体结构形成一体,与艉封板完全平齐。

1.3.2 起重作业系统

“海洋石油 201”设有一台超大型全回转起重机(图 1-5),它是大型起重铺管船极其关键的设备。它设置在船的尾部,可进行固定式起吊作业和回转式起吊作业,可对海上的大型海洋工程建筑、设施和设备进行起吊,使船舶具有起重、铺管和修管等多种作业功能。

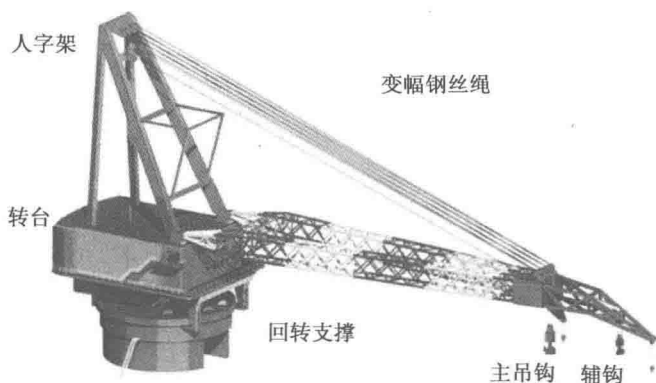


图 1-5 铺管船重型起重机

1.3.3 动力定位系统

DP 系统(Dynamic Positioning System)^[20],称为动力定位系统,是由位置检测装置(传感器)、推力器(执行机构)、动力装置(能源)和控制器等组成的一个反馈控制系统。其采用推力器来提供抵抗风、浪、流等作用在船上的力,从而使船尽可能地保持在海平面上要求的位置。在抛锚系泊有困难的深水作业区,以及不可能获得必要抓力的海底图纸条件下,动力定位是一种比较好的选择。

铺管起重船在铺管时使用 DP-2 系统,起重时使用 DP-3 系统。DP-3 系统的主要技术装置包括有冗余的发电机和原动机、功率管理系统、有冗余的推力布置、自动控制 and 手动控制、位置参照系统、陀螺罗经、UPS 电源。

DP 系统有 7 台推进器,其中 5 台是可回收式推进器,2 台是全回转主推进器。推进器在船体上的布置如图 1-6 所示,最左端的是主推进器,其余为可回收式推进器。

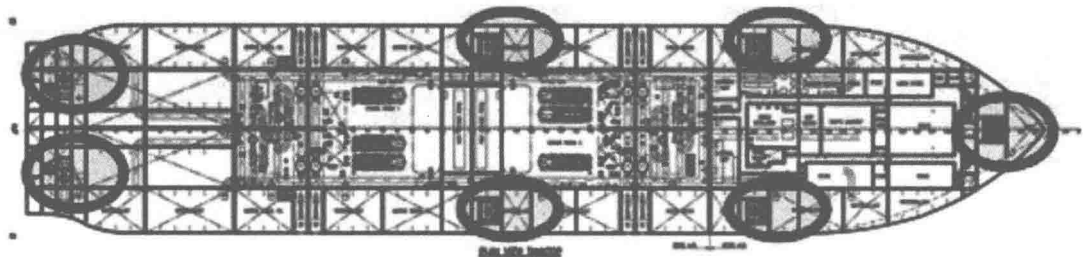


图 1-6 推进器在船体上的布置

与常规船 DP 系统相比,铺管船 DP 系统需要解决很多新的问题。

(1) 铺管船在给定路径上进行循迹作业时,需根据实际工程实时调节船舶的期望速度和加速度,并要求 DP 系统在控制船舶跟踪期望路径的同时,对船体速度和加速度进行控制,而常规 DP 只能控制船舶跟踪期望路径和速度,缺少加速度控制功能;

(2) 在管道铺设过程中水下管道悬跨段对铺管船会有很大的水平作用力(矩),DP 系统必须很好地补偿这部分干扰,保证铺管施工的顺利完成;

(3) 常规 DP 船循迹作业时只需直接对船体设置期望路径,但在铺管过程中却要根据不同的作业状态进行实时调整干预。

1.3.4 船体结构布置

船舶采用双层甲板,“A 甲板”可储存近万吨的钢管,“主甲板”为铺管作业甲板,配置主铺管作业线。“A 甲板”布置如图 1-7 所示,主甲板布置如图 1-8 所示。

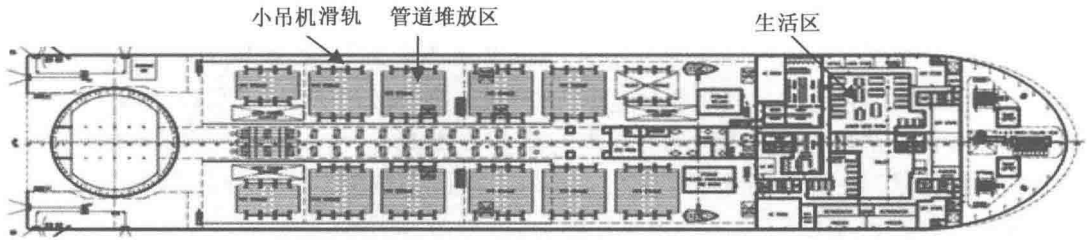


图 1-7 A 甲板布置

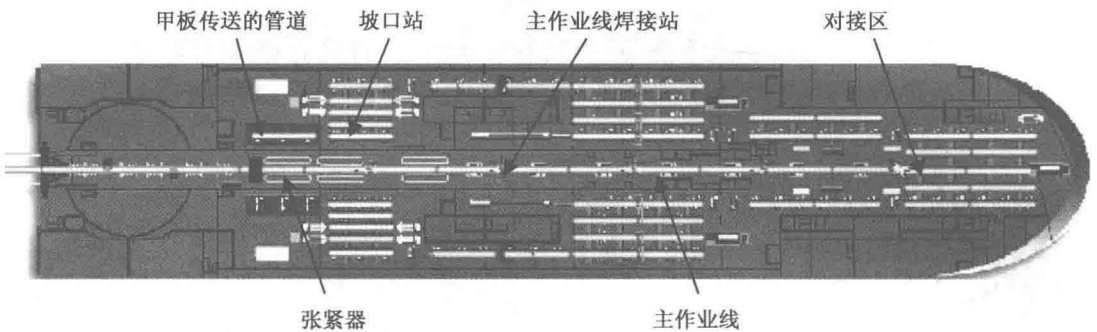


图 1-8 主甲板布置

1.4 海上铺管起重技术简介

1.4.1 海上起重作业技术

起重船是海洋工程中常用的工程船舶,是海上装卸、建港水工作业以及各种海上建筑物建造和安装的必备工具。起重船在风浪的作用下会产生危险的大幅摆动,这不仅会降低吊装的就位精度,严重时还会引起吊重与结构物的碰撞,导致设备的损坏和人员的伤亡。随着起重设备的大型化、重型化,起重难度越来越大,起重方式也越来越复杂。

在欧洲,早期专门用于码头作业的起重船在 14 世纪就已经出现了,到了 20 世纪,起重船开始向大型化发展。1997 年,大型起重船的起重能力已达到 $2 \times 7\,100\text{ t}$ 。

21 世纪以来,我国和东南亚地区海上工程建设不断增多,如南海、东海油气开发,海上风电场建设,跨海大桥、人工岛建设,以及一些大型打捞工程,都需要起重能力强的大型起重船,因而建造大型起重船兴起了一个小高潮。

大型回转起重船简称为起重船(Crane Vessel 或 Crane Ship)。常用的有两类船型,即单船体单起重机式的 MHCV (Mono Hull Crane Vessel) 和半潜平台船体双起重机式 SSCV (Semi-Submersible Crane Vessel)。另外,大型回转起重船有别于在内河、港湾作业的另一用途较广的扒杆式起重驳船 SLB (Sheer Legs Barge) 及自升式起重平台^[21-24]等。2001 年中海油工程公司投资建造了“蓝疆号”起重铺管船,起重能力为 $3\,800\text{ t}$ 。最近又投资建造了 $3\,000\text{ m}$ 深水起重铺管船“海洋石油 201”,起重能力为 $4\,000\text{ t}$,已于 2012 年交船。2006 年,

广州打捞局投资建造的 4 000 t 起重船“华天龙号”投入使用。另外,Seaway Heavy Lifting 公司投资建造的起重能力为 5 000 t 的新一代起重船,已于 2010 年交船。Nordic Heavy Lift 公司投资建造“Borealis”,采用桅式起重机,最大起重能力为 5 000 t。表 1-1 列出了部分现役大型起重船的起重性能,表 1-2 为其主要参数。

表 1-1 大型起重船的起重性能

船 名	船东	船型	船体平台类型	建造年	固定吊	回转吊
Hermod	Heerema	SSCV	半潜平台	1978	3 628 t×39 m 4 536 t×40 m	2 700 t×30.5 m 4 536 t×32 m
Balder	Heerema	SSCV	半潜平台	1978	2 720 t×33.5 m 3 600 t×37.5 m	1 980 t×27.5 m 2 970 t×33.5 m
DB101	J. Ray Mc Dermott	SSCV	半潜平台	1978	3 500 t×24 m	2 700 t×24 m
Thiaf	Heerema	SSCV	半潜平台	1985	7 100 t×31.2 m 7 100 t×31.2 m	7 100 t×31.2 m 7 100 t×31.2 m
Saipem7000	Saipem	SSCV	半潜平台	1986	7 000 t×42 m 7 000 t×42 m	6 000 t×45 m 6 000 t×45 m
DB 27	J. Ray Mc Dermott	MHCV	单船体	1974	2 400 t×30.5 m	1 400 t×35 m
DB 30	J. Ray Mc Dermott	MHCV	单船体	1975	3 080 t×33.5 m	2 300 t×24.4 m
Saipem3000	Saipem	MHCV	单船体	1976	2 177 t×39.6 m	2 177 t×39.6 m
大力	上海打捞局	MHCV	单船体	1980	2 500 t×45 m	500 t×35 m
Stanislav Yudin	Seaway Heavy Lifting	MHCV	单船体	1985	2 500 t×40 m	2 500 t×40 m
DB 50	J. Ray Mc Dermott	MHCV	单船体	1988	4 400 t×36.9 m	3 527 t×25 m
Castoro 8	Saipem	MHCV	单船体		2 177 t×39.6 m	1 814 t×33.5 m
蓝疆号	海油工程	MHCV	单船体	2001	3 800 t×30 m	2 500 t×44 m
华天龙	广州打捞局	MHCV	单船体	2006	4 000 t×40 m	2 000 t×45 m
Sapura 3000	Sapura Acergy	MHCV	单船体	2008	2 952 t×27 m	2 156 t×31 m
威力	上海打捞局	MHCV	单船体	2010	3 000 t×40 m	2 060 t×27.4 m
OlegStrashnov	Seaway Heavy Lifting	MHCV	单船体	2010	5 000 t×32 m	5 000 t×32 m
Borealis	Nordic Heavy Lift	MHCV	单船体	单船体	5 000 t×34 m	4 000 t×41 m
海洋石油 201	海油工程	MHCV	单船体	单船体	4 000 t×43 m	3 500 t×33 m

表 1-2 大型起重船主要参数

船名	总长 /m	型宽 /m	型深 /m	最小吃水 /m	最大吃水 /m	人员 /人	航速 /kn	动力 定位	锚泊 定位
Hermod	154	86	42	11.5	28.2	336	6	—	12 点
Balder	154	86	42	11.5	28.2	392	6.5	DP3	12 点
DB101	146.3	51.9	36.6	7.5	23.5	268	—	—	10 点
Thiaf	201.6	88.4	49.5	11.8	31.6	736	6	DP3	12 点
Saipem7000	197.95	87	43.5	10.5	27.5	725	9.5	DP3	16 点
DB 27	128	39	8.53	5.33	5.79	270	—	—	12 点
DB 30	128	48.2	8.53	3.66	5.79	294	—	—	12 点
Saipem3000	162	38	9	—	6.3	206	10	DP3	8 点
大力	100.0	38.0	9.0	3.7	5.2	236	5	—	8 点
StanislavYudin	183.2	36	13	5.5	8.9	143	12	—	8 点
DB 50	151.48	46	12.5	9.45	11.9	234	—	DP2	8 点
Castoro 8	191.4	35	15	6.7	9.5	359	8	—	12 点
蓝疆号	157.5	48	12.5	5.95	8	278	—	—	12 点
华天龙	174.8	48	16.5	8	11.5	300	5	—	8 点
Sapura 3000	151.2	37.8	9.1	4	6.5	330	8	DP2	—
威力	141	40	12.8	6	8.5	240	12	DP2	8 点
Oleg Strashnov	183	37.8/47	18.2	8.5	13.5	395	14	DP3	8 点
Borealis	180.9	46.2	16.1	6	9	400	14	DP3	8 点
海洋石油 201	204.65	39.2	14	7	11	380	12	DP3	—

图 1-9 为全回转式起重船“华天龙号”^[25-26]的起重作业情景,图 1-10 为中铁局大桥集团公司为建设宁波杭州湾跨海大桥而量身定做的“天一号”^[27]的起重作业情景,图 1-11 为“四航奋进号”^[28-29]2 600 t 起重船将一个重达 1 575 t、长 60 m 的混凝土预制箱梁稳稳地架在了距镇海约 5 km 处的金塘大桥 G18~G19 墩右幅。起重船主要技术特征如下所述。

1. 船型

大型起重船主要有单体式和半潜平台式两种船型。

(1) 单体式起重船最初采用驳船船型,后来发展为简单型线船型。其主要特点是:方形系数大($C_b \approx 0.9$),平行中体长,中剖面系数大。起重作业时,要求有足够的稳性,因此一般水线面面积都较大。

(2) 半潜平台式起重船主要由两个下浮体、多个立柱和上平台组成。下浮体提供拖航和作业时所需的浮力;立柱主要用于连接浮箱和上平台,其截面一般为圆形或矩形。作业时,下浮箱和部分立柱沉入水中,水线位于立柱截面,这样可大大减小水线面面积及波浪和水流作用在平台上的载荷,而其较大的水线面惯性矩又提供了平台作业时所需的稳性。上平台是存放设备和人员居住工作的主要场所。半潜平台式与单体式船型相比,有起重能力强、适应水深广、抗风浪能力强、甲板面积和甲板装载量大的优点。