



大型海上平台浮托法 技术研究与实践

金晓剑 主 编
李新仲 李 达 副主编

Large Platform Floatover Method
Research and Practice



科学出版社

大型海上平台浮托法技术研究与实践

金晓剑 主 编

李新仲 李 达 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

浮托法是伴随着海洋平台尺度逐步加大, 组块重量逐步增加而开发的万吨级组块整体安装解决方案, 采用上部组块整体设计、整体建造、整体驳船运输, 最终完成平台上部组块与下部导管架平台的整体对接安装。本书在总结超大型海上平台浮托法安装技术研究和实践经验的基础上, 从浮托法相关技术基础理论着手, 系统地介绍超大型海上平台浮托法总体设计技术和超大型海上平台组块整体建造安装技术, 为浮托法相关技术的应用和发展提供技术支持和理论基础。

本书可以作为高等院校船舶与海洋工程相关专业的本科教材或参考书, 亦可作为海洋工程开发设计、科研、生产、规划等部门的工程技术人员和管理人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大型海上平台浮托法技术研究与实践/金晓剑主编. —北京: 科学出版社, 2017.1

ISBN 978-7-03-051465-3

I. ①大… II. ①金… III. ①海上平台—组装—研究 IV. ①TE951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 322951 号

责任编辑: 张 震 杨慎欣 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张: 15

字数: 384 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

编 委 会

主 编: 金晓剑

副 主 编: 李新仲 李 达

高级顾问: 周守为 曾恒一 武广齐

顾 问: 乐 钻 梁 羽 田 政 张松浦 周学仲
王明伦 李健民 李志刚 王建丰 侯金林
范 模 黄业华 朱 江 孔令海 陈宝洁
李玉田 李明军

编 者: 杜夏英 易 丛 董宝辉 杨小龙 白雪平
王明伦 朱晓环 刘华祥 高 爽 赖 禹
马巍巍 郭 薇 陈可钦

前 言

伴随着海上油田勘探开发,海洋石油工业得到迅猛发展,海上作业平台正向大型化、集约化方向发展,海洋平台上部组块结构物的整体重量也随之增加。高速发展的海上油气田开发,对海上超大型平台的安装技术及作业能力提出了更高要求,传统的自安装和吊装等安装方式已不能满足日益加大的海洋平台组块安装的需要,制约了海洋资源勘探开采事业的快速发展,浮托法安装技术应运而生,浮托法安装技术是万吨级组块整体安装的最佳解决方案。

浮托法是在海洋平台上部组块整体建造的基础上,利用驳船实现整体海上运输,在安装过程中依靠潮位、驳船调载与升降机构等方式实施上部组块的升降,同时辅以专用连接部件,完成上部组块与下部导管架平台对接作业的安装技术。典型的浮托法安装过程包括上部组块的整体建造、整体装船、海上整体运输、施工待命、安装船进导管架槽口、对接前船位调整、上部组块和导管架对接、对接后船位调整、安装船退出等步骤,涉及海上工程作业的所有基本状态。与其他安装方式相比,浮托法具备“四整一零”的技术优势:①整体设计——实现平台组块的集成优化设计,减小界面误差;②整体建造——简化建造工序,大幅缩短建造周期,实现了海陆调试转换;③整体运输——显著提高拖航安全性和经济性;④整体安装——极大缩短海上作业时间,降低施工风险;⑤零调试——海上“零调试”,实现海上平台快速投产见效。

为适应国家能源安全保障的需要及海上超大型平台安装及建造的需要、未来深远海开发的需要,中国海洋石油总公司(以下简称中海油)针对浮托法存在的技术瓶颈,通过技术攻关研究,从整体设计、整体建造、整体运输和整体安装四方面攻克相关问题并形成了8项海上油田超大型平台浮托法安装关键技术:多体耦合数值分析技术、多自由度弹性约束综合分析技术、基于DSU的载荷转移技术、超大组块建造重量控制及称重技术、超大型多功能运输驳船设计技术、非连续性铰接同步拖拉技术、顺应自然力防碰撞技术、基于对接缓冲装置的精准对接及海上载荷转移技术。在攻克关键技术的基础上,中海油形成的具有自主知识产权的浮托设计软件系统、非连续同步拖拉滑靴装置、多功能称重和载荷转移系统、精确对接及载荷转移装置四项浮托法安装创新技术处于国际领先或国际先进水平,为浮托法在实际工程上的应用奠定了技术理论基础。

本书在总结超大型海上平台浮托法安装技术研究和实践经验的基础上,从浮托法相关技术基础理论着手,系统地介绍超大型海上平台浮托法总体设计技术和超大型海上平台组块整体建造安装技术,为浮托法相关技术的应用和发展提供技术支持和理论基础。全书共三篇18章,其中,第一篇为浮托法技术基础理论,包含第2~6章;第二篇为超大型海上平台浮托法总体设计技术,包含第7~13章;第三篇为超大型海上平台组块整体建造安装技术,包含第14~18章。第1章导论,主要介绍浮托法相关的基本概念、关键装置和国内外发展现状;第2章工程船舶稳性理论,包括浮体静力学的基础知识,重点介绍船舶的浮力、初稳性、风倾力矩、船舶大倾角稳性的计算方法;第3章工程船舶水动力理论,包括理想流体势流理论、波浪理论及波浪力计算方法和船舶横摇阻尼计算方法;第4章系泊系统设计和分析理论,主要介绍系泊系统的基础理论、常用的系泊方式、系泊系统的设计方法;第5章动力定位技术,主要介绍船舶动力定位的功能和实现方法;第6章多体耦合数值分析原理,主要介绍多体耦

合运动方程及求解方法、时域序列的后处理方法；第 7 章浮托法环境条件分析，介绍浮托法安装大型海上平台上部组块对风、浪、流、水深潮位的要求，浮托法安装的可操作性分析方法；第 8 章浮托装船分析技术，介绍大型海上平台上部组块整体装船过程中涉及的潮汐影响、滑道设计、船舶调载、船舶强度分析和稳性分析等内容；第 9 章整体运输技术，介绍大型海上平台上部组块整体运输过程中涉及的运输环境要求、运输船舶稳性和总纵强度要求；第 10 章系泊定位技术，介绍与浮托法相关的系泊系统布局方式、系泊设备的选择、系泊系统计算方法；第 11 章浮托安装耦合设计分析技术，介绍对接过程中上部组块、导管架和运输船三者之间的耦合设计环境条件和分析方法；第 12 章浮托法水池试验技术，介绍浮托法水池试验的相关理论、方法、测量技术等内容；第 13 章浮托法总体设计方法，介绍浮托法总体思路和设计方法；第 14 章超大型海上平台组块整体建造技术；第 15 章超大型海上平台组块整体拖拉装船技术；第 16 章超大型海上平台组块整体运输技术；第 17 章超大型海上平台组块整体安装技术；第 18 章浮托法关键技术创新及应用。

本书编写过程中编者注重理论与工程实践的紧密结合，在不同章节都通过工程实例对浮托法的关键技术进行详细说明。本书由金晓剑主编，李新仲、李达副主编。限于水平，书中缺点和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 11 月

目 录

前言	
第 1 章 导论	1
1.1 浮托法概述	1
1.2 浮托法安装过程	2
1.3 浮托安装关键装置	4
1.4 浮托法技术发展现状	5
1.5 中海油浮托法技术研究及创新	8
第一篇 浮托法技术基础理论	
第 2 章 工程船舶稳性理论	13
2.1 浮体静力学和稳性理论简介	13
2.2 静态浮体浮力计算	13
2.3 船舶稳性计算方法	14
2.4 船舶风倾力矩计算	15
2.5 船舶大倾角稳性计算	16
第 3 章 工程船舶水动力理论	17
3.1 理想流体势流理论基础	17
3.2 波浪理论及波能量谱	21
3.3 细小结构波浪力计算	25
3.4 大型浮体结构波浪力计算	26
3.5 船舶运动及动力学基础	28
第 4 章 系泊系统设计和分析理论	30
4.1 系泊系统简介及功能要求	30
4.2 悬链式和张紧式系泊系统	30
4.3 系泊系统理论基础	31
4.4 系泊系统设计方法	34
第 5 章 动力定位技术	37
5.1 船舶动力定位简介	37
5.2 动力定位控制理论基础	37
5.3 推进器类型和选择	39
5.4 动力定位控制系统设计基础	41
5.5 动力定位船舶运动分析	45
5.6 动力定位规范简介	46
第 6 章 多体耦合数值分析原理	48
6.1 多体耦合运动方程及求解方法	48
6.2 耦合刚度和阻尼矩阵计算	50
6.3 时域序列后处理方法	50

第二篇 超大型海上平台浮托法总体设计技术

第 7 章	浮托法环境条件分析	57
7.1	浮托法安装环境条件	57
7.2	可操作性分析	62
第 8 章	浮托装船分析技术	64
8.1	装船操作基本要求	64
8.2	潮汐对装船的影响	65
8.3	运输船滑道设计	65
8.4	装载货物重量及船舶调载计算	65
8.5	船体强度分析	66
8.6	装船稳性分析	67
第 9 章	整体运输技术	68
9.1	绑扎件	68
9.2	整体运输方案设计环境条件	68
9.3	整体运输稳性要求	69
9.4	运输船及货物运动分析	70
9.5	运输船总纵强度分析	71
9.6	波浪拍击	73
第 10 章	系泊定位技术	74
10.1	系泊环境条件确定	74
10.2	系泊系统布局	74
10.3	系泊缆及连接件的选择	75
10.4	系泊系统计算分析	76
第 11 章	浮托安装耦合设计分析技术	78
11.1	浮托环境条件确定	78
11.2	浮托安装分析步骤确定	78
11.3	护舷、LMU 和 DSU 模拟	80
11.4	运动限制及受力	84
11.5	计算结果处理	85
第 12 章	浮托法水池试验技术	87
12.1	海洋工程试验水池	87
12.2	相似准则及物理量间的转换关系	87
12.3	风、浪、流模拟	88
12.4	主体结构及连接件模拟	91
12.5	动力定位系统模拟	93
12.6	模型试验测量技术	94
12.7	数据采集及分析技术	95
12.8	浮托法安装模型试验内容	96
第 13 章	浮托法总体设计方法	98
13.1	设计因素分析	98

13.2	浮托法总体设计思路和方法	99
13.3	浮托安装总体设计实例	105
第三篇 超大型海上平台组块整体建造安装技术		
第 14 章	超大型海上平台组块整体建造技术	117
14.1	海工建造场地	117
14.2	5#滑道建造技术研究	119
14.3	超大型组块建造方法研究	122
14.4	滑道总装重量转移技术	125
14.5	超大型组块建造重量控制及称重技术	132
第 15 章	超大型海上平台组块整体拖拉装船技术	141
15.1	超大型组块整体装船技术	141
15.2	整体拖拉和回拖技术	149
15.3	装船调载技术	151
第 16 章	超大型海上平台组块整体运输技术	154
16.1	超大型平台组块运输驳船装备建设	154
16.2	超大型组块长距离运输安全分析	164
第 17 章	超大型海上平台组块整体安装技术	173
17.1	超大型组块浮托安装前现场定位技术	173
17.2	驳船进出导管架定位防撞技术	178
17.3	组块对接防撞系统设计及分析技术	192
17.4	南堡 35-2CEP 平台组块浮托安装实例	211
第 18 章	浮托法关键技术创新及应用	214
18.1	浮托安装关键技术	214
18.2	浮托安装创新成果	217
18.3	浮托法关键技术应用推广	219
18.4	浮托技术应用展望	224
参考文献		226

第1章 导 论

1.1 浮托法概述

伴随着海上油田勘探开发,海洋石油工业得到迅猛发展,海上作业平台正向大型化、集约化方向发展,海洋平台上部组块结构物的整体重量也随之增加。高速发展的海上油气田开发,对海上超大型平台的安装技术及作业能力提出了更高要求,传统海上平台安装方式面临着前所未有的挑战,制约了中国海洋资源勘探开采事业的快速发展。

传统海上结构物的安装主要有自安装和吊装两种方式。

自安装是指平台不需要借用外部资源设备,在预定海域依靠自身设备能力安装到位,如中国海洋石油总公司(以下简称中海油)渤中3-2自升式生产储油平台,靠自身的桩腿及升降装置实施升船,达到作业要求。该方法不需要借用浮吊等稀缺资源,节省了平台的安装费用。但是,该方法受水深和油田产能的限制较大,适合用于浅水小型油田。因此,自安装平台在较深海域大规模推广应用较为困难。

吊装又分为分块吊装和整体吊装两种方式。分块吊装,将平台上部结构分成若干组块,分别吊装到下部基础上焊接固定。重量近万吨的大型平台组块通常需要分成五六个子块,陆地单独建造,海上分别吊装拼接。这种安装由于各分块间界面繁多、接口复杂,给组块设计、建造、连接、调试带来极大不便,并且安装作业时间长,通常万吨级组块分块吊装安装的海上作业时间长达一个半月,海上调试时间超过三个月,安装投资巨大且影响生产进度。整体吊装需动用大型的起重船,将上部组块整体吊起放到平台下部结构上,实施焊接安装。受到浮吊起吊能力、结构强度和结构物尺寸、巨型起重船数量(很少)、使用费用等因素的限制,用该方法安装大型平台组块难度和成本较高,且不能用于超大型模块整体吊装。目前,世界最大起重船的静态起重能力为14 200吨,且万吨级以上的只有两艘,属于国外公司所有,均在国外作业。

要加快海洋石油发展,就必须改变传统的油田开发方式,寻找更经济、更快速的开发方案。因此,浮托法安装技术应运而生,浮托法是万吨级组块整体安装的最佳解决方案。

浮托法(浮托安装法)是利用驳船载运海上作业平台上部组块,在安装过程中依靠潮位、驳船调载与升降机构等方式实施上部组块的升降,同时辅以专用连接部件,完成上部组块与下部导管架平台对接作业的安装技术。在海上平台组块浮托安装过程中,组块采用拖拉装船方式装上驳船(图1.1),通过驳船载运其到达平台所在海域,进入事先特殊设计并提前安装就位的导管架槽口(图1.2),保证平台组块的立柱在相应导管架桩腿的正上方,并切割掉平台组块与驳船之间的连接,随着潮位降低或/和驳船压载导致的吃水增加,实现平台组块与导管架之间的对接,从而达到海上平台组块安全安装的目的。根据其作业过程,其对接原理可总结为获得净空、定位导引、主动寻址、对接合拢、载荷转移、安全分离。该项技术可实现万吨级大型组块、超大型组块的整体安装^[1]。

与采用其他安装方式相比,浮托法具备“四整一零”的技术优势:①整体设计——实现平台组块的集成优化设计,减小界面误差;②整体建造——简化建造工序,大幅缩短建造周期,实现了海陆调试转换;③整体运输——显著提高拖航安全性和经济性;④整体安装——极

大缩短海上作业时间，降低施工风险；⑤零调试——海上“零调试”，实现海上平台快速投产见效。

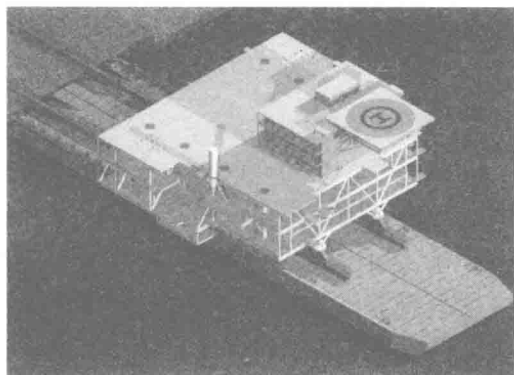


图 1.1 平台组块装船示意图

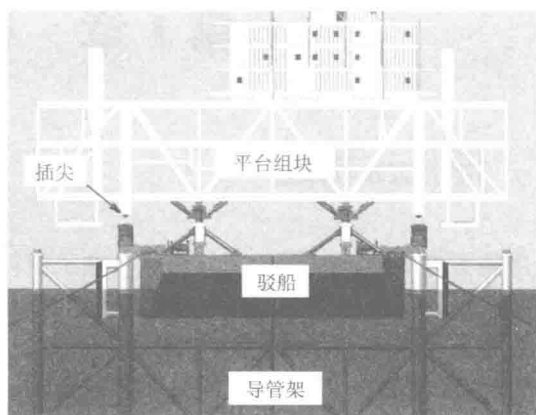


图 1.2 平台组块浮托安装示意图

根据组块安装时驳船的数量，浮托法可以分为单船浮托安装法（图 1.3）和双船浮托安装法（图 1.4）两类。单船浮托安装法是指采用一条驳船实现海上平台组块与导管架之间的安装连接，平台组块通过调载或/和潮位降低由单船体转移到导管架上。采用单船浮托安装法安装的组块，需要根据安装所采用驳船的尺度来对下部支撑结构进行特殊设计，以方便驳船进入下部支撑结构；而双船浮托安装法由两条驳船从平台两侧进入平台，对平台下部支撑结构的设计要求较低。到目前为止，大多数组块采用单船浮托安装法进行安装。与单船浮托安装法相比，双船浮托安装法对环境条件和现场操作人员水平要求极为严格，存在较大的技术风险，较少被工业界采用，截至目前世界上仅有两例工程实例，且均在环境条件极好的海域完成。



图 1.3 单船浮托安装法

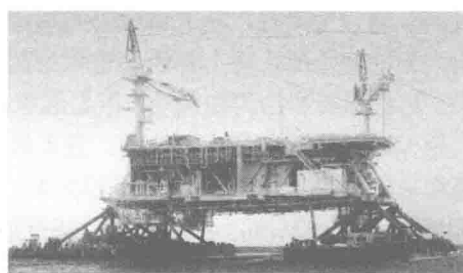


图 1.4 双船浮托安装法

目前，国内对浮托法的研究应用主要是单船浮托安装法，所以本书主要阐述单船浮托安装法的相关理论研究和应用。

1.2 浮托法安装过程

海上平台上部组块的浮托安装方法自 20 世纪 80 年代起成为一个有效的安装方法，经过工业界多年的实践与探索，不仅安装结构的重量不断增加，这种安装方法也不断挑战更加恶劣的施工海况。浮托法解决了组块建造受起重能力限制无法做大的矛盾，提高了平台建造效率，与吊装相比更加稳妥，提高了施工质量，减少海上作业时间，降低海上作业风险^[2-4]。

典型的浮托法安装过程包括上部组块的装船、海上运输、施工待命、安装船进导管架槽口、对接前船位调整、上部组块和导管架对接、对接后船位调整、安装船退出^[5,6]。下面以导管架上部组块浮托法安装为例,简单介绍上述各环节的实施和注意事项。

上部组块装船是浮托法安装过程的起点,装船一般需要借助滑轨进行(图 1.1),对装船设计起决定性影响的因素有上部组块重量、尺寸及重心位置、潮差以及码头高度和水深等。

装船完成后,上部组块与安装船甲板之间必须进行必要绑扎才可以开始海上运输。对拖航而言,稳性是关键问题。船体越宽、型深越大,初稳性和稳性范围就越好。但是,初稳性增加会导致横摇周期减小,在风浪中上部组块的重心加速度就会相应增大,这样一般会增大绑扎设计的困难。另外,安装船宽度会直接影响导管架槽口的宽度要求,较大的船宽对于导管架设计是不利因素。因此,在满足拖航稳性的前提下,船体型宽应该尽可能小。

在海上拖航完成后,进船操作开始前,安装船需要做一系列准备工作,如绑扎结构的切割和清除、系泊及定位监测系统的启动、负荷转移系统的启动、安装船压载调整等。在待命状态,安装船必须由系泊系统定位(动力定位安装船除外)。待命系泊系统的设计取决于油田布局、海况等因素。

当准备工作完成以后,如果正值预定的安装窗口期,进船操作就可以开始进行。大型海上平台上部组块海上整体浮托安装过程如图 1.5 所示。安装船将从待命位置进入导管架安装槽。进船过程必须注意以下几点:

- (1) 进船端必须与导管架槽口对齐;
- (2) 护舷与导管架之间的碰撞力必须小于导管架以及护舷本身的承受极限;
- (3) 进船过程中上部组块的安装腿与导管架腿之间不得有碰撞发生;
- (4) 安装船的纵、横向运动以及偏航角必须控制在一定范围内。

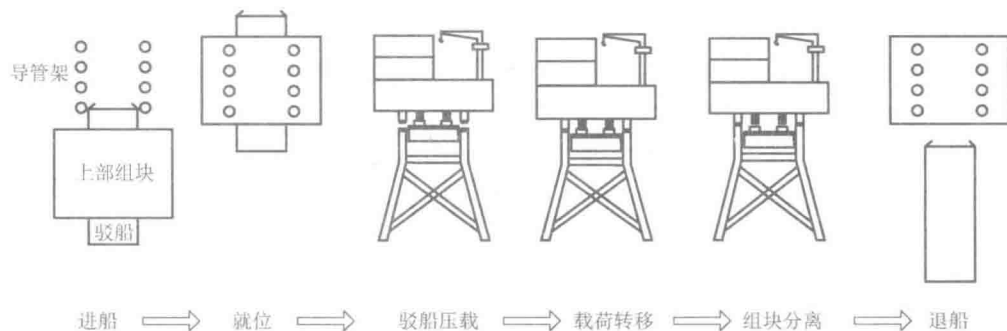


图 1.5 海上整体浮托安装过程示意图

当进船操作完成后,上部组块的安装腿需要与导管架腿对齐。一般情况下,对齐的允许误差取决于插尖和承接喇叭口的尺寸。对齐后,逐渐减少安装腿与导管架腿的间距,直到插尖进入承接喇叭口(图 1.2)。安装腿和导管架腿的间距减小可以通过增加安装船的压载水实现^[7,8]。

在该阶段,以下几点需要特别注意:

- (1) 有效限制安装船的横向和纵向运动;
- (2) 导管架侧向冲击载荷不得超过导管架和护舷的极限载荷;
- (3) 导管架腿上的垂向冲击载荷不得超过导管架和对接结构的设计极限载荷。

当安装腿和导管架腿的间距减小到零,就是对接过程的开始。在这个阶段,上部组块的

重量将会从 100%由安装船支撑, 转移到 100%由导管架支撑。上部组块重量的转移可以通过多种方法来实现, 最常见的是运用安装船压载调整和主动式液压支撑系统。

当负荷转移完成以后, 上部组块和支撑件间的冲击载荷仍然存在。只要这些冲击载荷有可能发生, 出船操作就无法进行。因此, 上部组块和支撑件的间距需要进一步增大。

在该阶段, 以下几点需要特别注意:

- (1) 有效限制安装船的横向和纵向运动以确保支撑件和上部组块之间较小的相对运动;
- (2) 导管架侧向冲击载荷不得超过导管架和护舷的极限载荷;
- (3) 支撑件上的垂向冲击载荷不得超过支撑件和上部组块支撑点的设计极限载荷。

当支撑件和上部组块的间距增加到允许值以后, 安装船便可以从导管架槽中退出。在这一阶段中仍需要满足以下操作要求:

- (1) 导管架腿上的侧向冲击载荷不得超过导管架和护舷的设计极限载荷;
- (2) 支撑件和上部组块之间不允许有垂向冲击载荷;
- (3) 控制安装船横向运动以及方位角;
- (4) 安装船底部和导管架安装槽底部横管必须保持一定间距;
- (5) 安装船必须有足够的干舷。

1.3 浮托安装关键装置

从前述的浮托法的基本步骤可以看出, 如何实现安装船顺利进入导管架并安全地实现载荷转移是浮托法海上安装作业的关键。由于外界环境对浮托法海上安装作业影响较大, 浮托安装过程中, 需要一些特定的设备与装置来完成海上安装^[9,10]。

1. 安装船

组块装船后, 浮托安装船(floatover vessel)把上部组块运输到指定海域, 并通过调节压载系统, 将上部组块安装到固定式结构或浮式结构上。影响海上运输船舶选择的因素很多, 综合考虑船舶的吃水限制、宽度限制、载重量限制、平台运输中的驳船稳性及上部大型组块的重量、重心位置等因素, 如何选择安全、经济的安装船是浮托法顺利实施的关键^[11]。

2. 甲板支撑装置

甲板支撑装置(deck support unit, DSU)也称为组块支撑装置, 位于组块和滑靴中间, 主要有两个作用: 在组块陆地预制和装船运输过程中起支撑组块重量的作用; 在浮托安装过程中缓冲驳船与组块分离时的冲击作用。DSU应根据实际安装工况来进行设计。

3. 桩腿对接耦合装置

桩腿对接耦合装置(leg mating unit, LMU)也称为桩腿对接装置, 是一种组块立柱和导管架钢桩的对接装置, 其底部与导管架腿相连, 上部与组块立柱相连, 是浮托安装承上启下的关键部件。LMU是浮托安装中非常关键的缓冲装置, 当浮托安装完成后, LMU成为导管架腿的一部分, 起到支撑组块重量的作用。LMU在浮托安装中起着非常重要的作用, 主要表现在以下几方面:

- (1) 在组块重量由 DSU 向 LMU 转移的过程中起到缓冲作用, 这是通过 LMU 套筒内部装置来完成的;
- (2) 组块立柱与 LMU 的自动对中是通过 LMU 的盘形接收器实现的。

4. 护舷系统

浮托法的护舷系统 (fenders) 由横荡护舷子系统和纵荡护舷子系统组成。横荡护舷系统主要用来限制安装船在进退船的过程中与导管架之间的横向运动, 防止安装作业过程中安装船对导管架桩腿内侧过大的碰撞, 以免造成桩腿的损坏和变形。纵荡护舷在安装过程中主要起两方面的作用: 一是在安装驳船进入导管架槽口时起限位止船作用; 二是在安装过程中防止因过大的纵荡对 LMU 的碰撞而造成损坏。

5. 快速压载系统

浮托法利用安装船的吃水差或潮差来进行上部组块的码头装船和现场安装。在潮差较小或不可利用潮差的海域进行装船或安装时, 要用到快速压载系统 (rapid ballast system)。通过快速调节驳船的压载系统, 利用外接水泵或海水阀箱向驳船压载舱内排/注水, 使驳船升沉, 从而实现上部组块重量由码头安全转移到运输驳船上或由运输驳船安全转移到基础结构 (导管架) 上。

6. 停泊/定位及监测系统

在浅水处安装作业时, 需要用到驳船甲板上的系泊系统 (系泊绞车等) 和辅助拖船等。这些辅助系统在驳船慢速靠近、最初进入、停泊和撤离等安装过程中, 起着非常重要的作用。在深水处进行浮托安装时, 只用到拖船系统和软线定位绞车 (soft line positioning winching system)。软线定位绞车主要的功能是限制纵荡和横荡的偏移量。如果在浮托安装中用到动力定位驳船, 定位绞车就可以不用。另外, 驳船上须安装定位监测系统, 用于监测浮托安装、撤离过程中驳船和下层基础的相对运动。

1.4 浮托法技术发展现状

在浮托法安装技术开发运用以前, 半潜式吊装船安装导管架上部组块已经是成熟的安装技术。通过多年的发展和运用, 浮托法安装技术作为吊装法的补充与替代也日臻成熟^[12-14]。

1.4.1 国外浮托法安装技术发展现状

世界上第一次浮托法安装应用是 1983 年 Phillips Maureen 项目 18 600 吨生产平台上部组合模块的安装。这次安装是在受遮蔽的水域完成的^[15]。开放水域中浮体结构的首次浮托法安装是 1993 年 24 000 吨 Auger 平台上部组块的安装, 该项目是在墨西哥湾水域进行的。

以上两个案例中组块与基座结构的对接过程都是通过安装船压载调整实现。1997 年, McDermott-ETPM 首次运用液压式 Smart-Leg 支撑装置在尼日利亚海域进行 Etkpe 4100 吨上部组块的安装。这种安装方式的优点是液压控制的 Smart-Leg 支撑装置在不调整安装船压载的情况下可以快速降低上部组块高度, 缩短施工时间, 安装腿对接件之间的碰撞概率可以大幅降低。

第一次动力定位系统辅助浮托安装是 2003 年泰国湾 PM-3 CAA 项目中心处理平台 9000 吨上部组块结构的安装 (图 1.6)。中国中远公司重型运输船泰安口号实现了本次安装, 动力定位分级是 DP-2。

2006 年 11 月, Technip 公司首次运用双浮托法在中国南海 (马来西亚 Sabah 以西 1320m) 深水域安装了 Kikeh Spar 的上部组块^[16] (图 1.7)。上部组块的重量为 3400 吨, Kikeh Spar 也

是安装在墨西哥湾以外的第一个 Spar 平台。

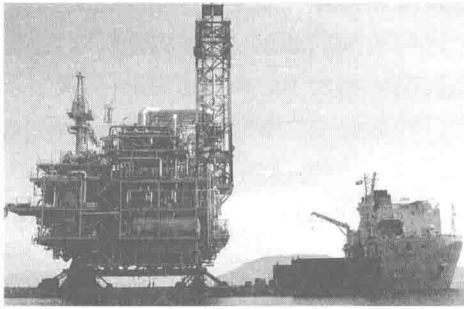


图 1.6 泰安口号运输船进行首次动力定位浮托安装

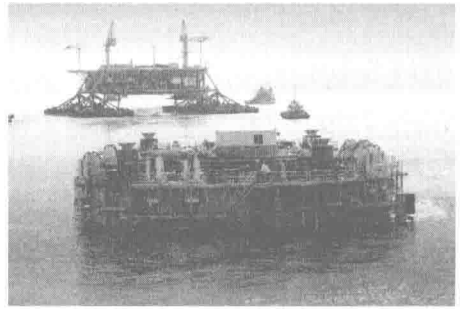


图 1.7 Kikeh Spar 上部组块双浮托法安装

2006 年, T 型驳船浮托安装首次在萨哈林岛(库页岛)海域 LUNSKOYE-A 平台 21 800 吨上部组块安装项目中得以运用。T 型驳船的使用显著增加了单船浮托安装承载组块重量的能力。

截至 2014 年 10 月, 世界上重量最大的浮托安装是萨哈林岛(库页岛) Arkutun-Dagi 油田的生产平台的上部组块安装(图 1.8)。本次安装施工于 2014 年 6 月完成, 安装船是 Heerema Marine Contractors 驳船 H-851。平台上部组块重量为 42 659 吨, 支撑框架重量为 5135 吨, 装船总重量达到 47 800 吨。

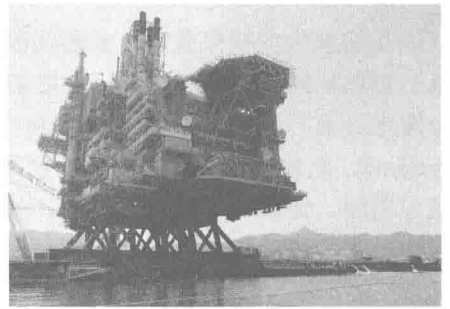


图 1.8 Arkutun-Dagi 47 800 吨浮托安装组块装船

目前, 浮托技术呈现如下特点: ①浮托重量由初期几百吨发展到现在的几万吨重, 浮托法已形成系列关键技术和安装装备; ②作业水深正由浅水向较深水域发展; ③作业海况正逐步面向恶劣海域; ④运载船舶已由常规无动力的驳船向具有动力定位的自航驳发展。

1.4.2 国内浮托法安装技术发展现状

随着中国浅海油气资源开发力度的不断加大, 大型海洋结构物越来越多。以前使用的在海上进行设备安装施工的方法已远远不能满足要求, 浮托法在海洋工程施工中应用的例子越来越多。十多年来, 浮托技术从引进到实际应用取得了重大的进展, 随着科学技术的不断进步, 浮托技术也将日益完善, 采用浮托法海上安装工艺是国内油田大型平台的发展趋势。

中国于 2002 年在渤海赵东油田首次用浮托法将 3200 吨 DPA 平台的上部组块安装在导管架上。2008 年, 旅大油田 27-2 PSP 平台上部组块的浮托安装首次攻克万吨安装重量大关(10 950 吨)。十多年来, 中国相继完成了包括锦州 25-1、南堡 35-2、渤中 34-1、金县 1-1、垦利 3-2、秦皇岛 32-6、荔湾 3-1、渤中 35-2、秦皇岛 32-6、惠州 25-8、锦州 9-3 在内的近 20 次浮托安装工程。多年来, 中国自主研发关键设备, 攻克了万吨级平台海上精准对接技术, 创建了海上油田超大型平台浮托技术体系, 建立了 5000~30 000 吨级平台安装的浮托船队和大型平台建造场地, 打破了国外技术和装备垄断。

2013 年 5 月 23 日, 荔湾 3-1 中心平台组块(3.2 万吨)浮托安装成功(图 1.9), 是中国深水和浅水浮托安装的分水岭, 填补了国内浮托领域的多项空白, 使中国成为世界上第三个

完整掌握 3 万吨级平台整体浮托的国家。荔湾 3-1 气田是中国在南海投入开发建设的第一个深水项目,实现了中国海上浮托安装作业水深从 24m 到 190m、浮托重量由 1.2 万吨到 3.2 万吨的大幅跨越。本次浮托应用了世界最强锚机及最长锚系,8 台 150 吨锚机,最大张力达 230 吨,锚缆每根长约 2500m;首次采用 T 型船浮托,“海洋石油 229”在同类船舶中作业能力达到亚洲第一、全球第二;设计了世界最强的护舷,使驳船防碰撞能力达 800 吨;采用了国内最大的组块支撑框架(deck support framework, DSF)和最重的桩腿对接缓冲装置(LMU),DSF 自重 4880 吨,重量较国内纪录提升近 3 倍,LMU 承重力达到 5000 吨级,较国内最重提升 1 倍。

2014 年 5 月 21 日,中海油在中国南海东部海域恩平油田群采用动力定位浮托安装的新技术成功完成了惠州 25-8 油田钻井生产平台组块的安装(图 1.10),圆满实现了国内动力定位浮托法安装海洋石油平台组块零的突破。惠州 25-8 钻采平台所采用的组块安装技术为世界首例恶劣海况动力定位浮托技术,具有自主知识产权,其平台尺寸和重量成功刷新动力定位浮托世界纪录,与传统采用普通非自航驳的浮托法技术相比,惠州 25-8 平台组块动力定位浮托技术采用 7 个推进器的自航驳船,海上作业效率大幅提高,节省了大量工程投资。

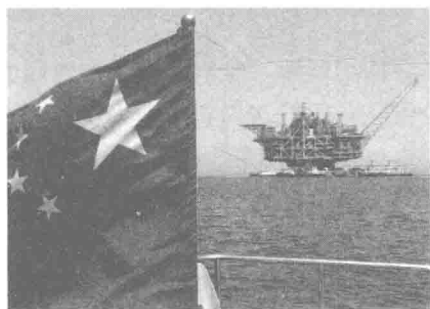


图 1.9 荔湾 3-1 上部组块浮托安装

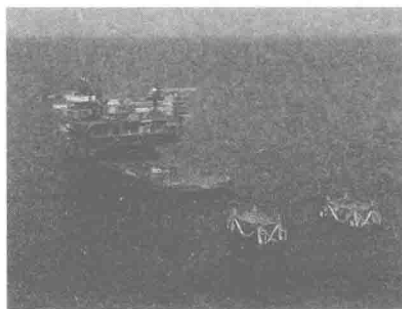


图 1.10 海洋石油 278 号进入惠州 25-8 导管架进行安装

2014 年 8 月 20 日,中海油以低位浮托方式,将重达 12 700 吨的陆丰 7-2 平台组块固定在距海平面 19m 预定位置,平台重量、作业水深为该浮托方式的世界之最^[17]。在南海陆丰 7-2 油田中心平台浮托安装设计中,首次采用了低位浮托安装设计,除常规机具之外,使用了拉力千斤顶的组块提升工具。低位浮托安装的特点如下:以低重心方式进行组块运输及对接作业,当组块与导管架完成对接后,采用拉力千斤顶将组块提升至设计高度。

2014 年 9 月 16 日,重逾万吨的锦州 9-3CEPD 平台由“海洋石油 228”船完成最浅水浮托安装,作业水深仅为 8.9m(图 1.11)。继中国最大动力定位浮托平台、世界最大低位浮托平台之后,锦州 9-3CEPD 平台安装成功使中国浮托安装技术再获突破。

中国自 2002 年引进组块浮托安装技术以来,走过了引进、消化吸收与再创新的过程,已先后完成十多个项目设计和应用。目前,中国组块浮托安装技术已经发展到一定规模,装备与经验都具有一定基础。组块浮托安装技术改变了以往分块设计、分块运输与分块安装的局面,缓解了施工资源的紧

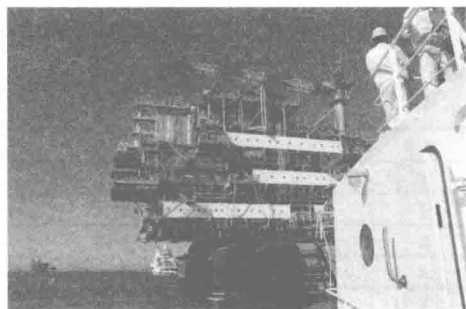


图 1.11 等待浮托安装的锦州 9-3CEPD 平台组块

张局面,使密集的海上施工成为可能,也为组块规模不断增大提供了有力保障。组块浮托安装技术改变了海上的传统作业方式,变分块运输与安装为整体运输与安装,节省了海上施工时间和成本。

1.5 中海油浮托法技术研究及创新

为了适应国家能源安全保障的需要,中海油总体发展战略的需要,大、中型稠油油气田开发的需要,海上超大型平台改变传统安装及建造方式的需要,未来深远海开发的需要,中海油从 21 世纪之初,组织了集中中海油研究总院、海洋石油工程股份有限公司在内的总体攻关团队,确定了海上油田超大型平台浮托技术的总体攻关路线和难点,开始进行浮托法技术的攻关研究,根据浮托法技术的流程和特点,就以下问题和难题进行专题攻关:如何在设计上解决多个刚体在多自由度弹性约束下的分析计算难题;如何进行超大型组块整体建造;如何保证“万吨组块”建造重量控制和精准称重以及解决载荷转移等难题;如何保证超大型组块拖拉同步性以及海上长距离运输安全性;如何保证超大型组块就位控制、无损碰撞以及控制精准对接。

中海油在消化国外技术基础上,针对技术瓶颈和实际应用环境,分析研究了国内四大海域的海况,开发了多个专用分析软件,研究了国内多个浮托驳船静水力和水动力特性,通过攻关研究,形成 8 项关键技术,即多体耦合数值分析技术、多自由度弹性约束综合分析技术、基于 DSU 的载荷转移技术、超大组块建造重量控制及称重技术、超大型多功能运输驳船设计技术、非连续性铰接同步拖拉技术、顺应自然力防碰撞技术、基于对接缓冲装置(LMU)的精准对接及海上载荷转移技术,为浮托法在国内应用奠定了技术理论基础。

中海油于 2005 年在南堡 35-2 油田上首次实施了浮托法安装,此后在 2006 年自主设计了渤中 34-1 油田中心处理平台组块的浮托安装。继渤中 34-1 中心处理平台设计、建造、安装应用成功之后,浮托法技术得到迅速推广,又于 2009~2011 年成功应用于后续的锦州 25-1 南油田井口平台和中心平台、旅大 32-2 油田生产储油平台以及金县 1-1 中心平台 4 座万吨级平台的浮托法设计中,总共完成了 6 座万吨级平台组块的整体浮托安装,其设计成果得到了海上安装的实际验证。2010 年中国南海深水区域平台组块的浮托法设计中,利用浮托法设计的荔湾 3-1 中心平台组块实现中国南海恶劣海况下首个深水平台组块浮托安装,该平台组块装船重量约 3.2 万吨,为世界上第二重的平台组块,其重量超过了世界上以往采用导管架作为支撑结构的所有平台组块,于 2013 年 5 月完成海上浮托法安装。中海油近年已建及在建的大型平台浮托安装平台组块信息如表 1.1 所示。

表 1.1 中海油近年已建及在建的大型平台浮托信息一览表

序号	油田名称	平台名称	组块重量/吨	安装时间
1	南堡 35-2 油田	中心处理平台	8 800	2005 年 5 月
2	渤中 34-1 油田	中心处理平台	9 200	2007 年 12 月
3	旅大 27-2/32-2 油田	生产储油平台	11 150	2009 年 10 月
4	金县 1-1 油田	中心处理平台	12 000	2011 年 5 月
5	锦州 25-1 南油气田	井口平台	6 500	2009 年 12 月
6	锦州 25-1 南油气田	中心处理平台	9 800	2009 年 12 月
7	荔湾 3-1 气田	中心处理平台	32 000	2013 年 5 月