

船舶与海洋工程专业规划教材

# 海洋工程水动力学试验研究

杨建民 肖龙飞 盛振邦 编著

上海交通大学出版社



责任编辑 / 王 珏  
陈祖英  
封面设计 / 荆 莉

www.jiaodapress.com.cn  
bookinfo@sjt.edu.cn

# 海洋工程水动力学试验研究

船舶原理 (上, 下)  
船舶设计原理  
海洋工程环境  
船舶动力装置  
船舶动力系统  
舰船动力装置系统仿真  
轮机自动化  
水运物流系统分析  
船舶与海洋工程环境载荷  
海洋工程水动力学试验研究

ISBN 978-7-313-05064-9



9 787313 050649 >

定价: 20.00元

船舶与海洋工程专业规划教材

# 海洋工程水动力学试验研究

杨建民 肖龙飞 盛振邦 编著

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书介绍船舶与海洋工程结构物在海洋风、浪、流环境条件作用下水动力性能的模型试验研究方法及相关理论。主要内容包括:海洋油气开发与海洋平台简介;海洋工程水动力模型试验的历史沿革、作用,国内外水池及其主要设施,水动力学基础;模型制作及海洋环境条件模拟的方法和理论;测量仪器的分类、标定及模型测试校验;模型在风、浪、流中的各种试验内容与方法;试验数据的处理与分析;试验研究项目的实施规程;深海平台模型试验技术概述。

本书是我国海洋工程国家重点实验室多年来试验研究工作的总结,同时吸收了国际上的最新研究成果,注重实践能力的培养。可作为高等院校船舶与海洋工程专业的本科生教材和研究生的教学参考用书,也可供海上油气开发部门、船厂、设计研究单位从事海洋工程科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

海洋工程水动力学试验研究/杨建民,肖龙飞,盛振邦  
编著. —上海:上海交通大学出版社,2008

船舶与海洋工程专业规划教材

ISBN978-7-313-05064-9

I. 海... II. ①杨... ②肖... ③盛... III. 海  
洋工程—海洋动力学—实验—高等学校—教材 IV.  
P731.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 194862 号

### 海洋工程水动力学试验研究

杨建民 肖龙飞 盛振邦 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:9 字数:219千字

2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

印数:1~2050

ISBN978-7-313-05064-9/P·079 定价:20.00元

版权所有 侵权必究

# 前 言

人类涉足海上油气开发已有 60 多年的历史,海洋平台的工作水深已由浅海拓展至深水海域。由于对能源的需求和海上油气资源的不断发现,我国和世界各国都十分重视海洋石油资源的开发,与之相应发展了适用于不同水深的各式海洋平台。当前海洋石油的产量已成为全世界石油总产量的重要组成部分,其份额已占 1/3 以上。海洋平台长期在某一海域的油田定点进行油气开采作业,遭受海上千变万化的风浪侵袭。各国石油开发部门或海洋石油公司,要求每一座海洋平台在百年一遇的狂风巨浪侵袭下不致损毁(称为平台的生存海况);在 6~7 级风浪时能够正常生产作业(称为平台的作业海况)。一座海洋平台的投资往往高达几十亿元,使用寿命大致 20~30 年。为了确保海洋平台能长期在海上进行生产作业,新设计的海洋平台,一般都要进行专门的模型试验研究,特别要进行相应于生存海况和作业海况条件时风、浪、流作用下的模型试验,测量海洋平台模型的运动和受力,并预报平台实体在海洋环境条件下的运动和受力,为海洋平台的设计、建造乃至安全生产运营提供科学依据。随着海上油气开采事业的不断发展,海洋工程水动力模型试验技术也随之迅速发展,许多国家在近 20~30 年内相继建造了海洋工程水池以满足模型试验研究的需要。

上海交通大学造船工程系于 1978 年更名为船舶及海洋工程系,在人才培养和科学研究方面从船舶拓展至海洋工程领域。根据我国海洋石油开发的需要,1985 年国家决定在上海交通大学筹建海洋工程国家重点实验室并于 1992 年建成。海洋工程国家重点实验室的建成,使海洋工程学科在人才培养和科学研究等方面迈出了更大的步伐。国内外许多著名单位与实验室合作(或委托)开展了众多海洋油气开发领域的重大项目的研究。在研究的实践中,我们深切感受到“海洋工程水动力学试验研究”已发展成了一门独立的学科分支。为了培养学生在海洋工程领域的科研实践能力,加强分析问题和解决问题的训练,我系于 1999 年开设了“海洋工程水动力学试验研究”课程,以课堂讲授和实验并重的形式进行教学。该课程先后由杨建民教授、肖龙飞副教授、王磊副教授等主讲,至今已有近十年的时间。遗憾的是国内外迄今还没有合适的专著或教材可供参考,这对于实施教学带来诸多不便,为此我们尝试编写一本合适的教材以弥补这方面的空缺。

本书是在杨建民教授、肖龙飞副教授历年所用讲稿的基础上编写而成的。编者在长期的教学实践中,结合实验室众多重大项目的研究工作以及国际船模试验池会议和有关国际学术会议发表的研究成果,充实和完善本书的相关内容。原上海交通大学海洋工程国家重点实验室主任盛振邦教授担任本书编写的顾问和全书的修改定稿。彭涛老师、李欣博士、吕海宁博士、李俊博士、胡志强博士、苏一华博士提供了部分资料,吕海宁博士、苏一华博士精心绘制了许多插图,并与房茂鹏硕士、曾志硕士、童波硕士、王颖博士一起参与打印和编辑书稿,在此一并表示衷心感谢。

全书共分 9 章。第 1 章为总论,简要介绍海洋资源和海洋油气开发概况,我国海疆和海上油气资源、海洋环境条件、海洋平台的种类。第 2 章介绍模型水动力试验研究的历史沿革及其对科技进步的作用,国内外主要海洋工程水池及主要试验设施。上述 2 章主要使读者在总体

上初步了解有关问题的概貌。第3章重点阐述模型试验研究的基础理论,包括:相似理论、海洋环境条件(特别是海浪)的理论描述、浮式海洋平台运动与受力的分析、线性系统响应的频域分析和时域分析方法。余下各章主要结合上海交通大学海洋工程国家重点实验室十多年的工作经验,系统地阐述海洋平台模型(包括锚泊线、立管等)的制作和有关参数的模拟调节;水池中风、浪、流等海洋环境的模拟;各类测试仪器的介绍和标定;模型在静水、规则波和不规则波中的试验;测量数据的采集;试验数据的处理与分析以及试验研究项目的实施规程等有关内容。此外,对于深海平台的试验技术也进行专题介绍,以适应海洋石油开发不断向深海拓展的需要。

《海洋工程水动力学试验研究》是一门专业课程,包含的内容相当广泛,有很强的实践性。上海交通大学海洋工程国家重点实验室作为配套齐全、设施一流的试验研究基地,为本课程贯彻培养学生实践能力和创新精神提供了极为有利的条件。因此,选择本课程的同学,都要结合教学内容,参加海洋平台模型试验的全部实验工作,以便通过本课程的学习,初步具备从事本领域实际工作的研究能力。

本书是高等院校船舶与海洋工程专业的本科生教材和研究生的教学参考用书,也可供海上油气开发部门、船厂、设计研究单位从事海洋工程科技人员参考。

由于本书在海洋工程水动力学试验研究领域首次公开出版,疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正为感。

**编者**

2007年7月

于上海交通大学海洋工程国家重点实验室

# 目 录

<b>第 1 章 总论</b> .....	1
1.1 海洋开发与海洋工程概述 .....	1
1.2 海洋油气开发简介 .....	2
1.3 我国的海疆和海上油气资源 .....	4
1.4 我国能源的形势和战略 .....	4
1.5 海洋环境条件综述 .....	5
1.6 海上油气开发装备——海洋平台的分类.....	10
<b>第 2 章 海洋工程模型水动力试验研究概述</b> .....	18
2.1 模型水动力试验研究沿革.....	18
2.2 模型试验对船舶及海洋平台科技进步的作用.....	19
2.3 国外海洋工程水池.....	21
2.4 中国海洋工程国家重点实验室.....	24
2.5 海洋工程水池的主要试验设施.....	27
<b>第 3 章 海洋工程模型试验研究的水动力学基础</b> .....	31
3.1 相似理论.....	31
3.2 海洋环境条件的理论描述.....	33
3.3 浮体运动的坐标系和六自由度运动.....	40
3.4 浮体所受的海洋环境载荷、流体作用力与系泊力 .....	42
3.5 附加质量、固有周期和阻尼 .....	46
3.6 线性系统的响应关系概述.....	50
<b>第 4 章 模型制作及海洋环境条件模拟</b> .....	53
4.1 模型缩尺比的选择.....	53
4.2 模型制作及相关参数的模拟.....	54
4.3 模型试验的海洋环境条件.....	63
4.4 风的模拟.....	65
4.5 流的模拟.....	67
4.6 波浪的模拟.....	69
<b>第 5 章 测量仪器的分类、标定及模型测试校验</b> .....	73
5.1 试验测量仪器的分类.....	73

5.2	试验测量仪器的标定	79
5.3	模型在静水中浮态的观测	82
5.4	静水中浮体模型的单自由度运动衰减试验	83
5.5	浮体及其系泊系统模型在静水中的测试	85
5.6	浮体模型的风、流作用力试验	88
<b>第6章</b>	<b>模型在波浪中的试验</b>	<b>89</b>
6.1	试验前水池的准备事项	89
6.2	模型在规则波中的试验	93
6.3	模型在不规则波中的试验	94
6.4	模型水动力试验的种类	95
6.5	试验数据实时采集系统简介	102
<b>第7章</b>	<b>试验数据的处理与分析</b>	<b>104</b>
7.1	误差分析与数据处理	104
7.2	时域统计分析	106
7.3	频域谱分析	109
7.4	交叉谱分析	111
7.5	规则波试验数据分析	113
7.6	海洋工程水池试验数据处理与分析软件	114
<b>第8章</b>	<b>试验研究项目的实施规程</b>	<b>118</b>
8.1	项目实施的流程框图	118
8.2	技术任务书	118
8.3	总体安排与试验大纲编制	120
8.4	试验准备	122
8.5	水池试验	122
8.6	试验总结	123
<b>第9章</b>	<b>深海平台模型试验技术概述</b>	<b>125</b>
9.1	解决深海平台模型试验技术的途径	125
9.2	混合模型试验技术	127
9.3	混合模型试验技术的可靠性验证	130
<b>参考文献</b>		<b>137</b>

# 第 1 章 总论

## 1.1 海洋开发与海洋工程概述

全世界的海洋面积约占地球总面积的 70%，海洋中蕴藏着丰富的自然资源，对人类的生活、经济建设及科学技术发展有极其重要的作用。自古以来，人类就对海洋进行开发利用，但在 20 世纪 50 年代以前，主要限于海上航运、海洋渔业捕捞、海水制盐业以及对海洋科学有限的探索。从 20 世纪下半叶开始，世界上许多沿海国家纷纷划定 200n mile 的专属经济区，竞相开发海洋。人们确信海洋中几乎可以获得陆地上所有的一切资源。因此，21 世纪被称为是海洋的世纪。

### 1.1.1 海洋资源

海洋中蕴藏的资源种类繁多，粗略说来，大体包括下列四个方面的内容。

(1) 海洋是蛋白质的宝库，水生物是蛋白质的主要来源。蛋白质是人类生活的必需品之一，海洋蛋白质资源的开发对人类的生存与发展非常重要。

(2) 海底蕴藏着各种矿产资源，其中石油、天然气的储量十分丰富。自 20 世纪 60 年代开始，海洋油气开采已成为新兴产业，目前海洋石油产量已占全球总产量的 30% 以上，以后还将逐年增加。锰结核是会年年生长的永久性资源，具有重要的开采价值。据专家预测，海洋中部分金属的蕴藏量较陆地蕴藏量高出的倍数为：锰 4000 倍，钴 5000 倍，镍 1500 倍，铜 150 倍，铁 4 倍。其他矿产资源在海底的蕴藏量也比陆地多。目前人们集中开采的是石油和锰结核。

(3) 海水及其所含的物质本身是宝贵的资源，极具开发价值。例如，海水淡化将为人类提供重要的淡水资源。在海水中可以提取铀和重氢等原子能的重要原料，有专家估计：全世界的海水体积约为  $1.37 \times 10^7 \text{ km}^3$ ，全部海水中的含铀量约  $5 \times 10^9 \text{ t}$ ，含重氢约  $1.99 \times 10^4 \text{ km}^3$ 。制盐则早就是人们对海水资源的利用。

(4) 大量的海洋自然能源如潮汐、海流、波浪等都具有大量的能量可资开发利用。不同深度海水的温差、盐度差等也都可用作发电的资源。

### 1.1.2 海洋开发

所谓海洋开发，主要是指海洋及其周围环境的资源开发和空间利用，其内涵的深度和广度随着科学技术的进步而不断发展。现时海洋开发的内容，大体可概括为下述五大类。

#### 1. 海洋资源的开发

海洋资源的开发主要为海洋资源和能源的利用。包括：石油、天然气、固体矿物的开采；生物资源，鱼类与其他各种海洋生物的开发利用；自然能源，潮汐、海流、波浪、温差、盐度差发电以及海洋大气风能和太阳能的利用；水资源，海水淡化，海水中化学元素的提取，海水的直接利用等。

### 2. 海洋运输

海洋运输主要包括:人员、货物、材料、能源、信息等运输或传递。包括:船舶和各种海面上和海水中的交通工具;电缆、光缆的电力输送和通信信号传输;海底管道中输送石油与天然气等。

### 3. 勘探与测量

勘探与测量包括:有关海洋资料与数据的采集、分析和显示,包括水文、潮汐和海洋学的有关资料;利用各种科技手段探测海洋资源、结构物、特性等并预测其蕴藏量。

### 4. 海岸带的开发

海岸带的开发包括:利用与发展海岸和沿海水域的活动,如港口、航运和码头的建设;水上游乐场所、人工岛建设、围海造田。海岸带的开发还包括农业、渔业、盐业等。海岸带是人类海洋开发的前沿基地和黄金地带。

### 5. 海洋环境保护

海洋环境保护主要指防止海洋及其周围地区环境的恶化、变坏或损失等的措施,包括污染控制、侵蚀与沉积的控制、海岸保护与航道疏浚、安全保护、防波堤、防浪墙、船舶避风港的建设等。

## 1.1.3 海洋工程

海洋工程是为海洋资源开发提供一切手段和装备的总称,其主要内容可分为海洋资源开发技术与设施技术两大部分。

(1) 资源开发技术。主要包括:海洋矿物、石油、天然气的勘探、开采、储运等;海水资源利用技术、淡化提炼、渔捞技术、海洋养殖技术、海洋能利用技术等。

(2) 装备设施技术。主要包括:海洋勘探开发装备技术、救助设备、潜水技术、遥控技术、海洋土木建筑技术、海洋工程船舶技术等。

海洋资源的内涵丰富而广泛,基本上包罗万象。因此海洋工程所涉及的装备和技术内容也十分广泛。它与土木建筑、水利、机械、造船、航海、航空、电力电机、电子、仪器、仪表、计算机、农业、生物、化学、材料、采矿、采油等工程技术密切相关。海洋资源的开发必须与各类科学技术领域有机结合和综合应用,是内容十分广泛的系统工程。由于海洋资源开发的目的是和技术不同,其内涵也各有侧重。对于船舶与海洋工程专业而言,现时主要从事的科技领域是各类船舶和海洋油气的钻采平台。

## 1.2 海洋油气开采简介

海洋底部蕴藏油气资源的地域、储藏量及是否可供开采等都要依靠勘探去查明。从海洋油气勘探到发现油田,再到油气开采的稳定生产,都要经过相当长时间的准备阶段,其主要过程大体包括下列四个阶段。

### 1. 勘探

其目的是发现海上油气田,分为普查、精查和试钻探三个步骤。

#### 1) 普查

对某一海域利用海洋调查船、勘探船上的各种探测技术(磁场、声波、重力、人工地震)以及

海底地质、地貌的分析,初步调查海域范围内的油气资源及其分布概况。

## 2) 精查

对普查中认为油气可能比较集中的区域进行细致密集的勘探,通过各种勘探技术、地质、地貌的测量资料的分析,初步估计该区域油气的集中范围和储藏量。

## 3) 试钻勘探井

对精查中预计油气比较集中的区域利用钻井船或钻井平台试钻勘探井。获得具有工业价值油气流的第一口井称为“发现井”。然后根据地质资料,与“发现井”在同一地质构造的若干处再钻勘探井,这些勘探井称为“评价井”或“探边井”,借以证实在第一口井所发现的油层范围内油气的性质、产量,进而对该区域的储藏量和可开采量作出评价。

## 2. 油田估产和开采决策

根据精查和试钻探的评价资料,进一步分析和估计油田的范围、油气的贮藏量和可开采量,并进行经济分析和油气开采的可行性分析,作出对该油田是否值得开发的决策。如果决定开发,则需制订该油田的开发方案和选择合理的开采工艺。

## 3. 采油工程建设

包括:海洋石油平台的设计、建造以及在海上的就位安装;海底油井的设置、采油的成套设备、原油的处理系统;生产人员的配备及工作生活设施;平台在海上生产石油的输送系统(海底输油管道或穿梭油船)等全部采油工程项目。

## 4. 正式投产

采油工程项目建设完成并经过安装调试,确认各系统在调试后能顺利运作,该油田即可投入正常的油气生产。

海上油田从决定开发到正式投产,一般需要4~5年的时间。由于投资巨大,常采用边开采边扩大的模式,既能早期开采出油,又能逐步扩大生产,尽量减少开发投资的风险。

海洋石油平台是进行海上作业的场所,根据石油钻探和生产的需要,主要分为钻井平台和生产平台。

钻井平台上主要配置钻井设备,包括井架、钻杆、钻头等钻井系统,海底井口设备、封井系统以及控制操作系统等。钻井平台的任务是在海底建造油井,当钻至需要开采的储油层深处,该油井即可完钻,在井口中插入管柱,做好采油的准备工作。固定式钻井平台因不能移动,在钻井任务完成后常改作采油平台。

生产平台又称采油平台,是专门从事海上石油的开采、处理、贮存等生产性的作业平台。主要配置采油设备和油气处理设备。采油设备的井下部分是插入油井储油层(生产层段)的采油管柱。井口设备是由各种高压阀门组成的采油树,采油树上装有油咀以控制井口的液流。采油方法有自喷采油(如油层压力很高)和泵系统采油,其作用是将油气从储油层汇集至井底,并通过管道抽吸至井上。从油井中流出的流体是原油、天然气和污水的混合流体,先经过分离器进行脱水处理。脱水后的原油进入贮油罐并可输送至陆上贮油站;分离出来的污水经污水处理系统达到排放标准后就地排入海中。经过分离器得到的天然气再进行净化处理,达到标准的天然气可输送至陆上的贮气站,小部分废气则通过烟囱就地点火烧掉。

由上述可见,海洋油气开采牵涉的专业面很广,船舶与海洋工程专业的业务范围主要是海洋平台的设计建造,以及与调查、勘探、生产、维护等相关的水面船舶、半潜和深潜器等载体的设计建造。

### 1.3 我国的海疆和海上油气资源

我国海域辽阔,北起渤海之滨,南达南沙群岛,东南面与太平洋相连,跨越温带、亚热带和热带三大气候带。海区周围与朝鲜半岛、日本、菲律宾、印度尼西亚、马来西亚、新加坡、泰国、柬埔寨、越南等国家相界。海域的总面积约  $4 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,海岸线长约  $1.8 \times 10^4 \text{ km}$ ,大小岛屿 6000 多个。

渤海是相当封闭的内海,与黄海相邻。其水文、气象受大陆的影响较大。渤海是浅海,水深平均为 18m,最大为 70m。由辽东湾、渤海湾等部分组成,南北长约 300n mile,东西宽约 160n mile,面积约为  $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

黄海为半封闭的浅海,位于我国大陆与朝鲜半岛之间,其水文、气象易受大陆的影响。南北长约 470n mile,东西宽约 300n mile,面积约为  $3.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。水深平均为 44m,最大水深 140m。

东海为一边缘海,其水文、气象主要受太平洋的影响。南北长约 700n mile,东西宽约 400n mile,面积约为  $7.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,水深平均为 370m,最大水深达 2000m 以上,台湾浅滩的水深仅 15m~20m。

渤海、黄海和东海有时总称为东中国海,处中纬度地带,总体上具有温带海的性质。东中国海大部分海域的水深在 200m 以内,大陆架的面积约占 80%。

南海的全称是南中国海,是与太平洋和印度洋相连的边缘海,面积约  $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。南海的水深很大,平均水深约为 1140m,最大水深达 5000m 以上。南海中岛屿众多,较为著名的有西沙群岛、南沙群岛、东沙群岛和中沙群岛等。南海西北角有北部湾和暹罗湾,北部湾的水深较浅,约为 100m。

我国海域的油气蕴藏量相当丰富。国土资源部从 1999 年到 2004 年组织实施“新一轮国土资源大调查”,在中国管辖海域全方位进行了油气资源战略性调查。调查结果表明,海域油气资源量可达  $4 \times 10^{10} \text{ t}$  以上的油当量,是中国 2003 年进口石油总量( $9.113 \times 10^7 \text{ t}$ )的 430 多倍。其中,南海的石油地质储量估计在  $2.3 \times 10^{10} \text{ t}$  至  $3 \times 10^{10} \text{ t}$  之间,是世界四大海洋油气聚集中心之一,有“第二个波斯湾”之称,极具勘探开发潜力。

自 20 世纪 60 年代初开始,我国首先对渤海湾进行油气的勘探与开采。至 20 世纪 80 年代,对黄海、渤海、东海、珠江口海域、南海北部湾、海南岛南侧的海域由近及远进行了油气的勘探与开采。海洋石油的产量迅速增加,1996 年的年产量首次超过  $1 \times 10^7 \text{ t}$ ,2002 年首次超过  $2 \times 10^7 \text{ t}$ ,2005 年已达  $4 \times 10^7 \text{ t}$ 。海洋油气已成为我国能源供给的重要组成部分。

半个多世纪来,我国海上油气的开采取得很大的成绩,但主要集中于近海浅水区域,对于远海深水海域尚处于起步阶段。向远海深水区域勘探和开采油气资源,已成为当务之急。

### 1.4 我国能源的形势和战略

改革开放 20 多年来,我国在国民经济的发展和人民生活水平的提高方面取得了巨大的成就。与此同时,对能源的需求也与日俱增,连续 20 多年的经济高速增长和人民的生活需求,使我国能源的短缺状况日趋明显。新世纪以来,全国许多省市电力供应不足,拉网限电的现象时

有发生,柴油供应也曾一度出现过紧张情况。

我国是世界上能源的生产大国,2003年中国的能源生产是世界第三位,煤产量居世界首位,石油、水电也是名列前茅。但是我国又是世界上的能源消费大国,2003年石油消费总量达到 $2.74 \times 10^8$  t,超过日本,成为仅次于美国的世界第二大石油消费国。预计到2020年,需求量将达 $4 \times 10^8$  t,年均递增12%。据国家统计局表明:在2000年以前,我国国民经济平均年增长为9.7%,石油消费年增长为5.77%,而我国石油生产的年增长仅为1.67%,其缺口依靠进口来弥补。我国至1996年已成为石油的净进口国,2003年进口原油 $0.91 \times 10^8$  t,占国内石油消费总量的33%,是继美国、日本之后的世界第三石油进口大国。2005年我国消耗石油 $3.17 \times 10^8$  t,进口 $1.36 \times 10^8$  t,进口依存度达42.9%。2006年1~9月,进口量达到 $1.38 \times 10^8$  t,已经超过2005年全年进口量。

能源是国家的命脉,关系到我国经济建设和战略安全。国家已经提出了可持续发展走新型工业化的道路,到2020年国民经济总产值要比2000年翻两番,实现全面建成小康社会的目标。但是能源不足将在相当长的时期内成为制约我国国民经济发展的一个重大问题,千方百计增加国内能源生产和降低能源消费,“开源节流”是解决能源短缺的重要措施,但仍然不足以弥补大量的缺口。根据统计资料预测:到2020年,中国的石油缺口约 $2.5 \times 10^8$  t~ $4 \times 10^8$  t,天然气缺口约 $8 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>,需要依赖从国外进口。实施能源国际化的战略方针是解决我国能源短缺的重要措施之一。

所谓能源国际化的战略措施,就是从世界进口石油和天然气,确保国民经济建设持续发展获得所需的能源。为此,需要建立稳定安全的能源(石油、天然气)供应链,包括:

- (1) 能源供应国(石油、天然气输出国)。
- (2) 能源运输。
- (3) 安全抵达我国(输入国)的能源库。

我国大量进口石油和天然气,将能源链暴露在错综复杂的地缘政治的格局之中,从而对我国的能源安全提出了严峻的挑战,一旦遇到战争、外交或其他紧急情况,我国有可能面临断油、缺油的危险。为此国家实行和平外交方针,寻求、扩大可靠的供应国,以确保石油、天然气的充足货源。同时组建一支强大的油轮船队,承担我国进口石油的运输任务,以确保能源运输的安全。

目前我国石油进口的主要来源是中东地区(伊朗等国家),另外从俄罗斯、非洲和亚太地区也进口了大量石油。除纯粹以贸易方式进口石油外,中国的石油公司以设备、技术等投资形式在中东、非洲的一些国家中联合开采油气资源,从中分得属于我国的石油份额。此外,我国石油公司还采取收购国外石油公司股份等形式进行投资,借以获得属于我国的经济利润和石油份额。

无论是开采我国海域的油气资源,还是和国外联合开采,都是为了缓解我国的能源短缺。海洋油气开发已经成为国家能源战略的重中之重,对国民经济建设、国家安全战略有着十分重要的意义。

## 1.5 海洋环境条件综述

海洋平台一般是在某一海区定点作业,要受到海洋环境条件的影响。从海洋工程水动力性能研究的角度来说,所谓海洋环境条件,通常是指风、浪、流及水深。

## 1.5.1 风

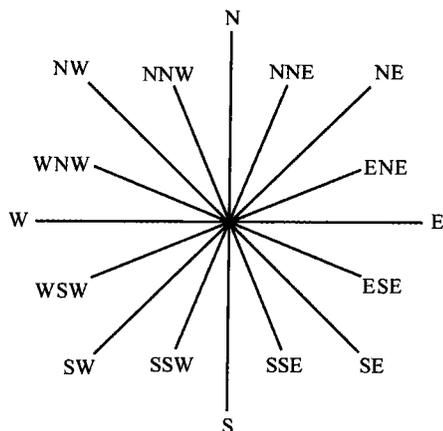


图 1-1 风向方位图

风是常见的自然现象,与人类的生活和生产活动关系密切。风的特征主要是风向与风速。风向是指风吹来的方向,习惯上用 16 个方位来表示,如图 1-1 所示。图中 N 为北、E 为东、S 为南、W 为西、NW 为西北、NNW 为西北偏北、WNW 为西北偏西等。风速是空气在单位时间里流动的距离,一般以 m/s 或 kn(n mile/h)来表示。我国采用国际上通用的蒲氏风级表将风速分为 13 个风级。

海上风速和风向是与大气运动密切相关的自然界随机现象,有所谓季风、寒潮大风、热带风暴、台风、飓风等各种名称。狂风或风暴必然引起海上的巨浪,海洋平台直接受到它的威胁。因此,风是影响海洋工程的重要环境因素之一。

海洋平台所在的作业海区,如有统计资料绘制的风玫瑰图(见图 1-2),则可求得一年中出现大风天数的平均值,以供施工作业参考。为保证海洋平台长期作业的安全性,常以五十年一遇或百年一遇的最大风速作为设计风速。

## 1.5.2 浪

海面上产生波浪的原因很多。如风作用于海面产生的风浪,月球引力的改变产生的潮汐波,海底火山或地震产生的地震波,船舶行驶产生的船行波等等。通常所说的海浪一般是指风浪。风浪是海面上分布最广、对于船舶航行和海洋平台生产作业影响最大的波浪。因此,这里介绍的浪是指风浪。

由于风是形成海浪最常见的原因,习惯上人们常把浪和风联合在一起。海平面上风的运动形式(风向、风速大小)复杂多样,因而风所引起的海浪在形式上也极为复杂。风浪的大小及其传播方向是紊乱和不规则的,不可能用一个简单的数学公式来描述,所以经常把风浪称为不规则波。对于流体力学中以简单的数学关系来表征的波浪称为规则波。

风在停止作用后海面上仍然存在的波浪,或传播到风区以外的波浪可以认为是接近二因次的规则波,通常称为涌浪,其特点是一个接着一个谐和前进的波浪。大风暴兴起的波浪具有很大的能量,可以传播到风暴区以外很远的海域,逐渐形成规则的涌浪。

海面上形成的波浪除与风速、风向及风的作用时间有关外,还与海域是否开阔、海水的深

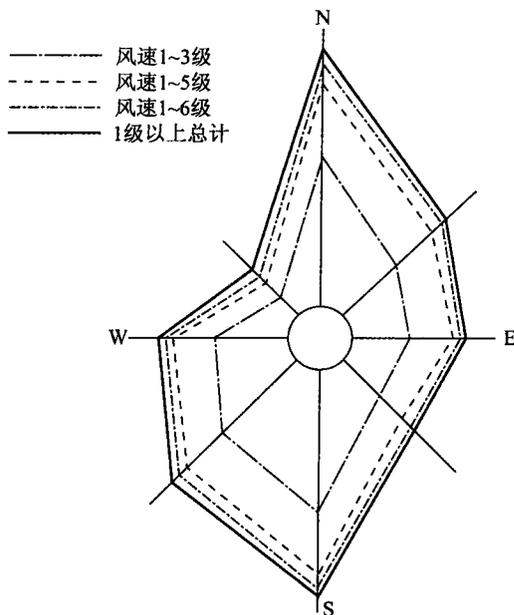


图 1-2 风玫瑰图

浅等因素有关。波浪的特征主要是波长、波高以及传播速度和方向。人们常见的风浪主要有：

(1) 长峰波。由同一方向传播的一系列波浪所组成，为二因次波，有规则波和不规则波两种。涌浪是一排排波峰线很长的波由远处传来，形状整齐，可以认为是规则波，通常海面上所见的都属不规则长峰波。

(2) 混合波。海面上往往既有远方传来的涌浪，又有风在该处产生的波浪，成为两者混杂在一起的混合波。

(3) 短峰波。海面上由于风向的变化或不同方向的风浪叠加在一起，波峰线很短，称为短峰波。短峰波是三因次波。海面上见到一堆一堆的锥形波浪，是短峰波中最为明显的例子，人们称之为三角浪或金字塔浪。

(4) 浅水波和破碎波。远处深海中的波浪向浅水区域传播的过程中，因受水底的影响，波浪的形状不断变化，从深水波变为浅水波。在很浅的水域，波峰会向前翻卷而破碎，称为破碎波。

海浪的威力十分巨大，是影响海洋工程最重要的环境因素。为保证海洋平台长期作业的安全性，常以五十年一遇或百年一遇的最大波浪作为设计的依据。海洋平台所在的作业区域如有统计资料绘制的波浪玫瑰图，则可以估计海洋平台在一年中能够进行生产作业的天数。

各国气象部门或海洋局常以风级、浪级或海况等描述海上风浪的情况，有些还给出了风级和波浪高度的关系。由于海域的情况不同，各种资料常有差异，在具体使用这些资料时应特别予以注意。国际上通用的蒲氏风级表将风划分为 13 级，对于风名、风速、海面特征、浪高等都有一般性的描述(见表 1-1)。我国国家海洋局将海浪分成 10 级，并给出了波浪的名称和浪高范围(见表 1-2)。

表 1-1 蒲氏风级表

风级	风名	风速/(m/s)	海面特征	浪高/m	海面状况
0	无风	0~0.2	海面平静如镜(无浪)	—	平如镜
1	软风	0.3~1.5	海面有波纹，但无白色波峰	0.1	微波
2	轻风	1.6~3.3	波纹虽小，但已明显，波峰透明如玻璃但不碎	0.2	小波
3	微风	3.4~5.4	波较大，波峰开始分裂，泡沫有光，间有白色波浪	0.3	
4	和风	5.5~7.9	小浪，波长较大，往前卷的白碎浪较多，有间断呼啸声	1.0	轻浪
5	劲风	8.0~10.7	中浪，波浪相当大，白碎浪很多，呼啸声不断，有时有浪花溅起	2.0	中浪
6	强风	10.8~13.8	开始成大浪，波浪白沫飞布海面，呼啸声大作，可能有少许浪花溅起	3.0	大浪
7	疾风	13.9~17.1	海面有如波浪堆成，碎浪白泡沫开始成纤维状，随风吹散，飞过几个波峰	4.0	巨浪
8	大风	17.2~20.7	中高浪，波长更大，随风吹起的纤维状更明显，呼啸声更大	5.5	狂浪

(续表)

风级	风名	风速/(m/s)	海面特征	浪高/m	海面状况
9	烈风	20.8~24.4	高浪,泡沫纤维状更浓密,海浪翻卷,泡沫将影响能见度,怒涛	7.0	怒涛
10	狂风	24.5~28.4	大高浪,波浪长形突出,纤维状泡沫更浓密,成片状,海浪颠簸有如槌击,浪花飞起带白色,能见度受影响	9.0	汹涛
11	暴风	28.5~32.6	特高浪,海上的中小型船舶有时可能被浪所蔽,波峰边缘被风吹起泡沫,能见度受影响	11.0	非凡现象
12	飓风	32.7~36.9	空气中充满泡沫和浪花,海面因浪花飞起成白色状态,能见度剧烈降低	14.0	

表 1-2 中国国家海洋局浪级

浪级	名称	浪高/m
0	无浪	0
1	微浪	$<0.1$
2	小浪	$0.1 \leq \bar{H}_{1/3} < 0.5$
3	轻浪	$0.5 \leq \bar{H}_{1/3} < 1.25$
4	中浪	$1.25 \leq \bar{H}_{1/3} < 2.5$
5	大浪	$2.5 \leq \bar{H}_{1/3} < 4.0$
6	巨浪	$4.0 \leq \bar{H}_{1/3} < 6.0$
7	狂浪	$6.0 \leq \bar{H}_{1/3} < 9.0$
8	狂涛	$9.0 \leq \bar{H}_{1/3} < 14.0$
9	怒涛	$\bar{H}_{1/3} \geq 14.0$

### 1.5.3 流

海洋中水的流动是一种自然现象。海流是大范围的海水以相对稳定的速度沿水平方向连续的流动,它有一定的流程、宽度、厚度和速度,其特征主要是流向与流速。海流是海洋中主要的动力源之一,和风、浪等要素同时对海洋工程有直接的作用。在设计海洋平台的水下部分时,必须考虑海流引起的载荷。

海流是由各种原因引起海水转移而形成,且与气候、地域等因素密切相关。风海流是因为风在海面吹过使海水产生的流动。潮流是因为潮汐涨落使海水在水平方向上周期性的流动,由外海到内海流向港湾的潮流称为涨潮流,由港湾流向外海的潮流称为落潮流。在海岸、河口、海湾、海峡和港湾等处,由于地形限制,水流速度的最大与最小值相差较大。海洋环流是由大气和海洋相互作用而形成的海流,全世界海洋中最强的环流是墨西哥湾流,其表面流速为3.0m/s,其次为黑潮,表面流速为2.0m/s。陆地上的大江大河水系,因融冰或大量降雨而使

河水猛涨,形成强大的水流流向外海,入海后又继续向外延伸而形成海流。此外,还有暖流和寒流等形成的海流。

海流的情况比较复杂。有的海域水流速度随水深的变化不大,可以近似地以平均流速来表示,而有些海域的水流速度随水深的变化较大,则应考虑水流速度随深度变化的规律。海洋平台在作业海区内海流的分布以及流速、流向的变化,是根据长期积累的统计结果与实测资料相结合为依据进行分析。为了保证海洋平台长期作业的安全起见,常以五十年一遇或百年一遇的最大流速作为设计流速。

#### 1.5.4 水深

水深是指海洋静水面至海底的垂直距离,通常称为海洋平台的工作水深。海洋中浅水区域和深水区域都有丰富的油气资源,因此海洋石油开采的工作水深范围很大,从几十米直到二三千米以上。水深范围的定义随海洋科学技术的进步会发生变化,目前,人们通常把500m以下水深称为浅水,500m~1500m水深称为深水(Deepwater),1500m以上水深称为超深水(Ultra-deepwater)。水深对于海洋平台形式的选择有很大的关系,例如对浅水区域常采用固定式平台,在深水和超深水区域则选用浮式平台。

海底的情况相当复杂,有地形与地貌的特征、海底沉积的特征、泥沙运动规律、海底沉积层的力学性能等。所有这些因素在固定式平台的设计、建造和安装中都应仔细考虑。海底情况对浮式平台的影响较小,但水深对平台的系泊定位系统(锚泊线的长度、悬链线的伸展范围等)有直接的影响。

从海洋平台水动力学研究的角度来说,一般不考虑海底的地形地貌,认为海底是平整的,由此确定平台在风、浪、流作用下的受力,作为平台结构强度计算和设计的依据。

#### 1.5.5 海冰

在寒冷地区海域作业的海洋平台,会遭受海冰侵袭的威胁。海冰对海洋平台的作用力是冰压力,例如:海洋平台被巨大的冰层包围;在潮流和风的作用下大面积的冰层有整体移动趋势,海洋平台会受到挤压;因环境温度变化引起冰层的膨胀,产生挤压海洋平台的膨胀力;自由漂浮的流冰会撞击海洋平台而产生冲击力等。因此,海冰对海洋平台的作用力是寒冷结冰海域所必须考虑的控制载荷。

#### 1.5.6 极限海况和作业海况

海上的风浪情况千变万化,有时风平浪静或风浪很小,有时则狂风巨浪乃至12级以上的台风浪潮。对于海上风浪的划分有多种描述,蒲氏风级表和我国海洋局的浪级表是典型的宏观表示方法。风平浪静或狂风巨浪是海上风浪出现概率很少的特殊情况,多数是介乎两者之间。

恶劣海况对于海洋运输船舶的危害相对较少,它们可以根据气象预报驶离危险区域以躲避狂风巨浪的袭击。对于海洋石油平台则不然,它们长期在某一特定海区油田从事生产作业,必须能经受住最恶劣海况的侵袭而不致损毁。因此,海洋油气开发是高风险的行业。一座海洋平台的初始投资极为昂贵,使用寿命大致为20年至30年。根据海上油气开发及海洋环境条件的特点,对于海洋平台结构及其装备的设计、建造及生产作业必须满足下列两种特殊海洋

环境条件。

(1) 生存条件(Survival Condition):是指保证海洋平台及其设备安全的最苛刻的条件。海洋平台在狂风巨浪的侵袭下,工作人员虽已撤离,但海洋平台本身的结构、锚泊系统必须具有足够的强度,不致被狂风巨浪损毁或冲走。另外,平台上各系统的所有设施能经受住风浪的侵袭而不致损坏,以保证在恶劣海况过后,工作人员返回平台能继续从事生产作业。生存条件所对应的海况称为最大的极限海况(Ultimate Limit State)。通常取海域环境统计资料中平均100年(有时取50年)只出现一次的最恶劣、最危险的海况,简称百年一遇海况。

(2) 工作条件(Operational Condition):是指工作人员和设备能够坚持进行生产作业的条件。海洋平台虽然受到风、浪、流的作用,但平台上的采油系统、油水分离处理系统以及人员生活起居设施系统的各种装备仪器等仍能安全运行,坚持正常生产作业。工作条件所对应的海况是海洋平台能够坚持生产作业的最高海况,简称作业海况(Operation Sea State),大体相当于6~7级海况。

海洋平台水动力性能试验研究特别关注的是上述两种特殊海况。对于平台在百年一遇的恶劣海况下,要测量和预报平台在风、浪、流作用下的运动、载荷、锚链受力等各项数据,作为平台结构、各种系统及锚链等设计和建造的依据。对于平台在给定的作业海况下,同样要测量和预报平台的运动、载荷、锚链受力等各项数据,借以检验、分析和评价各种系统设备能否正常安全运营,工作人员是否能承受晕船等现象而坚持工作。

此外,陆上建造的海洋平台需要拖运至指定海域,然后进行就位、安装并对各系统检测调试后才能投入生产。为了保证上述工作的顺利安全起见,常对在给定的海洋环境条件下进行平台模型拖运和安装的水动力性能试验。海洋平台的拖运和安装通常都是在海面相对平静的季节进行,因而对模型试验所给定的海洋环境条件大体相当于3~4级海况。

## 1.6 海上油气开发装备——海洋平台的分类

人类对于海上油气的开发是从近海浅水区域开始,以后逐步走向远海深水区域。1887年,在美国墨西哥湾离海岸不远的几米深的海水里,建造了世界上第一座海洋平台,这是海洋石油勘探开发的起步点,也是世界海洋工程产业的起步点。20世纪40年代之前,海洋石油勘探开发处于初始阶段,主要建造木结构海洋平台和人工岛,作业水深小于10m。20世纪50~60年代,海洋石油勘探开发迅速发展,出现了浮式海洋平台,作业海域范围不断扩大,水深不断增加。至20世纪60年代末,作业水深已超过200m,开始向大陆架深水区延伸。20世纪70~80年代,随着海洋平台和钻井技术的发展,作业水深超过500m,成功开发了欧洲北海和美国墨西哥湾大陆架深水区油气资源。20世纪90年代以后,海洋油气勘探开发取得巨大进步,作业水深不断刷新,作业范围已扩展到西非、南美、中国、东南亚、澳大利亚等世界各大洲海域。目前,海洋油气钻井平台的工作水深已超过3000m,生产平台的工作水深也已超过2000m。

海洋平台分为固定式和浮动式两类,固定式平台主要用于浅海区域的油气开采,浮动式平台可用于浅水、深水及超深水海域的油气开采。一般来说,所有开采油气的海洋平台,都配置采油系统、油水分离处理系统和工作人员起居设施系统的各种装备,同时可将处理后的原油由海底输油管道或穿梭油轮运往陆上贮油库储存。

### 1.6.1 固定式海洋平台

固定式海洋平台的特点是平台本体离水面有一定高度,平台上设置采油、处理设备及人员的生活舱室等。整个平台由打入海底的桩柱来支承,固定于某一特定油田,平台本体基本上不受风浪影响而晃动。根据支承平台的方式,固定式平台又可细分为:

#### 1. 固定式导管架(桩基式)平台(Jacket Platform)

由陆上工厂将造好的钢结构导管架运往油田,正确就位后由桩基将整个导管架牢固地插入海底,以支承平台本体。

#### 2. 重力式(混凝土式)平台(Concrete Platform)

支承平台本体的桩柱以及下体全部由钢筋混凝土组成,依靠本身的重量,平稳牢固地坐于海底,因此称为重力式平台或混凝土式平台。

#### 3. 坐底式平台(Bottom-supported Platform)

这类平台由水面以上的本体和底部的下体组成,两者之间由若干立柱连接,下体在坐底时支承平台的全部重量。

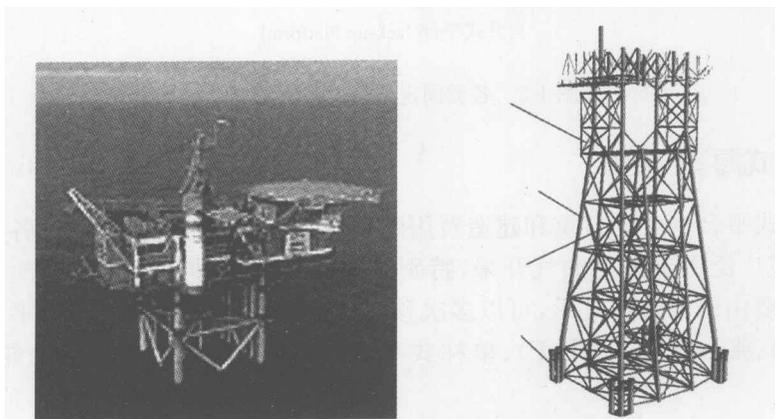
#### 4. 自升式平台(Jack-up Platform)

这是平台本体能自行升降的钻井平台,分独立腿式和沉垫式两类。独立腿式由平台和桩腿组成,各桩腿互相独立,整个平台的重量由各桩腿分别支承,各桩腿底部设有桩靴以增加支承面积。沉垫式平台由平台本体、桩腿和沉垫组成,沉垫连接各桩腿的下端成为公共的箱形基座,以支承整个平台的重量。各桩腿与平台本体连接处之间设有升降装置,使平台能沿着桩腿上下移动,因而称为自升式平台。

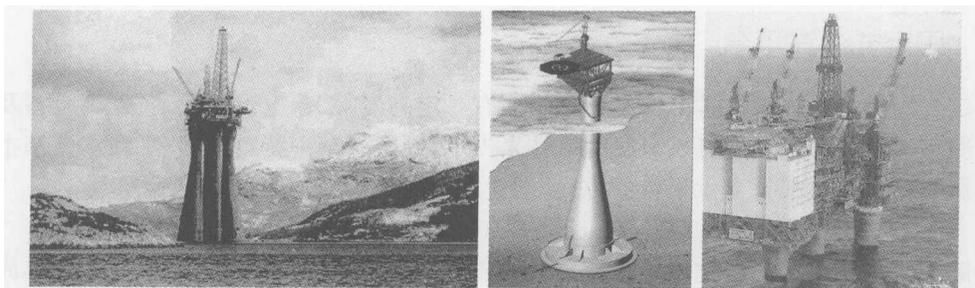
#### 5. 极浅海步行坐底式钻井平台

这是我国胜利油田和上海交通大学设计开发的一种平台,在极浅海中坐底装置可以沿海底靠专门机构移动,每次动作平台能向前移动8m。获得1995年国家发明二等奖和专利金奖。

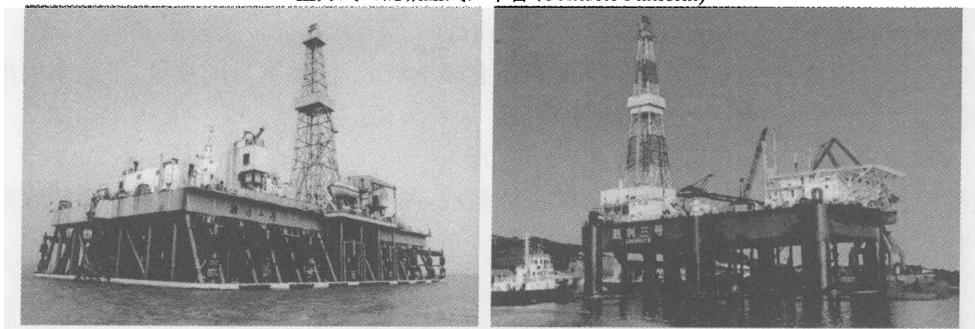
图1-3给出了各类固定式海洋平台的照片。



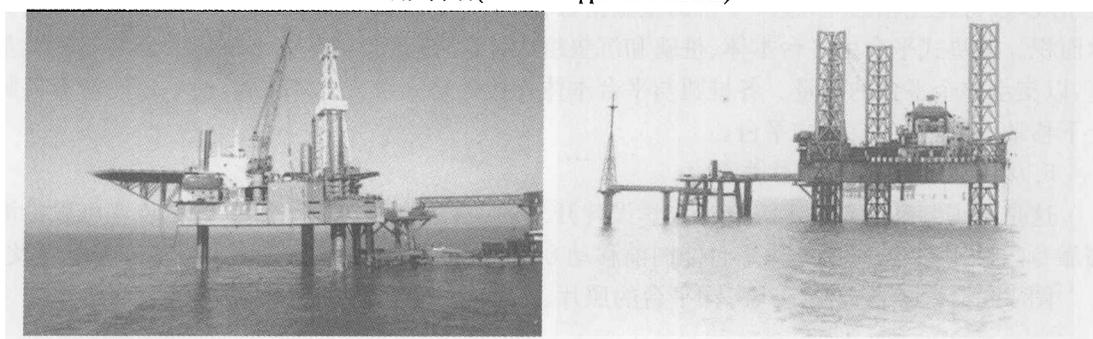
固定式导管架(桩基式)平台(Jacket Platform)



重力式(混凝土式)平台 (Concrete Platform)



坐底式平台(Bottom-supported Platform)



自升式平台(Jack-up Platform)

图 1-3 各类固定式海洋平台的照片

## 1.6.2 浮动式海洋平台

由于固定式平台本身的自重和建造费用随着水深的增加而急剧增长,各类浮动式平台应运而生,并被广泛用于海上油气开采,特别是深水海域的油气开采。浮动式平台的特点是平台重量主要由水的浮力支承,可以多次移位、重复使用。目前,浮动式平台主要有半潜式平台(SEMI)、张力腿平台(TLP)、单柱式平台(SPAR)和浮式生产储油轮(FPSO)四种类型。

### 1. 半潜式平台(Semi-submersible Platform, 简称 SEMI)

半潜式平台由数个竖直柱形浮体(立柱)与水平浮体(下浮体)联结而成以支撑上部模块,并由多根锚缆锚固于海底,如图 1-4 所示。下浮体是没入水中的船形浮箱,提供的浮力支承平台的重量。立柱的水线面面积较小,所以在遭遇风浪时平台的横摇和纵摇运动很小,但垂荡运

动较大。半潜式平台一般依靠锚泊系统定位,通常由辐射状布置的8个以上的锚组成,悬链线状的锚链将锚和平台的立柱固接。对于定位要求较高的半潜式钻井平台,通常还装备有动力定位系统进行定位。半潜式平台抗风浪能力强(抗风 $100\sim 120\text{kn}$ ,波高 $16\sim 32\text{m}$ ),适应水深范围广(数 $10\text{m}$ 至 $3000\text{m}$ 以上),钻机能力强(钻井深度可达 $10000\text{m}$ 以上),具有多种作业功能(钻井、生产、起重、铺管等),采用多根柔性立管,平台主体与上部模块可在码头边进行一体化建造,以降低海上安装费用。半潜式平台的主要缺点是仅适用于湿井口,维护费用较高,疲劳问题较为突出,对立管不利,对载荷变化承受能力较小。目前世界上半潜式生产平台的最大工作水深已达 $1920\text{m}$ ,最新的第6代半潜式钻井平台最大工作水深已达 $3657\text{m}$ ( $12000\text{ft}$ ),最大钻井深度达约 $15240\text{m}$ ( $50000\text{ft}$ )。半潜式平台具有适应深水采油的能力,用途广泛,其发展仅次于FPSO,目前已发展到第六代。

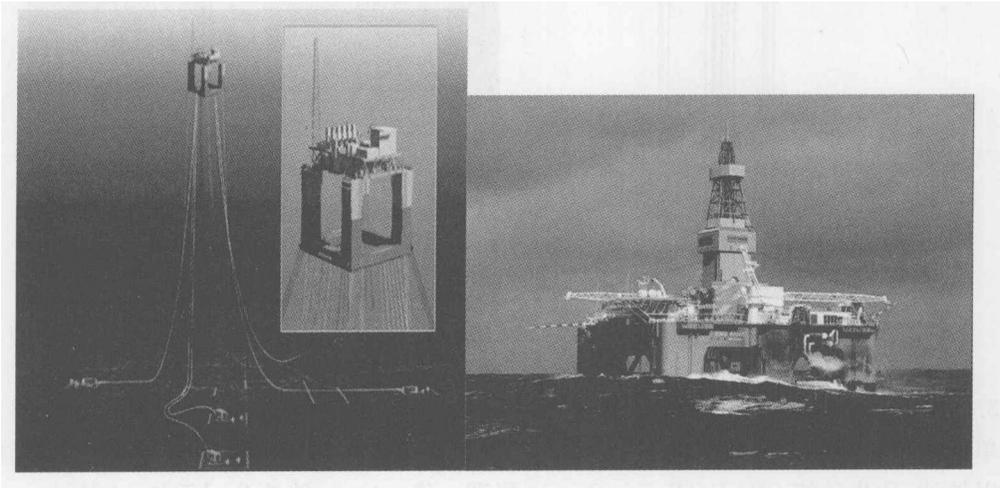


图 1-4 半潜式平台

## 2. 张力腿平台(Tension Leg Platform,简称 TLP)

张力腿平台是在半潜式平台的基础上发展起来的一种深水顺应式平台,结构形式与半潜式平台类似,但每个柱形浮体下由数根垂直张力缆索将其固定于海底,如图 1-5 所示。这些垂直系索被超过结构重量的剩余浮力拉紧,结构的浮力是由垂直柱体和水下水平浮筒结构提供。主要特点是:平台的垂向运动在张力缆索的系泊下得到很大的改善,波浪上的运动性能良好。由于 TLP 纵荡、横荡及首摇固有周期在 $100\text{s}$ 以上,远高于海浪的特征周期,而其垂向运动、横摇和纵摇的固有周期又较小( $2\text{s}\sim 5\text{s}$ ),远低于海浪的特征周期,所以可以有效避免在波浪中的共振现象,波浪上的运动性能较好,降低了 TLP 在波浪上的运动响应。

TLP 最大的优点是可以采用干井口和刚性立管,采油树和防喷口可以安装在甲板上,操作起来犹如固定式平台,维护费用也较低;平台主体与上部模块可在码头边进行一体化建造,以降低海上安装费用。其主要缺点是:对上部结构重量变化敏感,有效载荷的调节能力较小;对高频载荷敏感,张力缆索易于疲劳;因造价原因,水深适用范围受到限制,不宜太深。世界上第一座 TLP 诞生于 1984 年,由 CONOCO 公司建造,位于欧洲北海  $148\text{m}$  水深的 Hutton 油田。目前世界上工作水深最大的是 2004 年投入使用的 Magnolia TLP,达  $1425\text{m}$ ,由 CONOCO 公司建造,位于美国墨西哥湾。

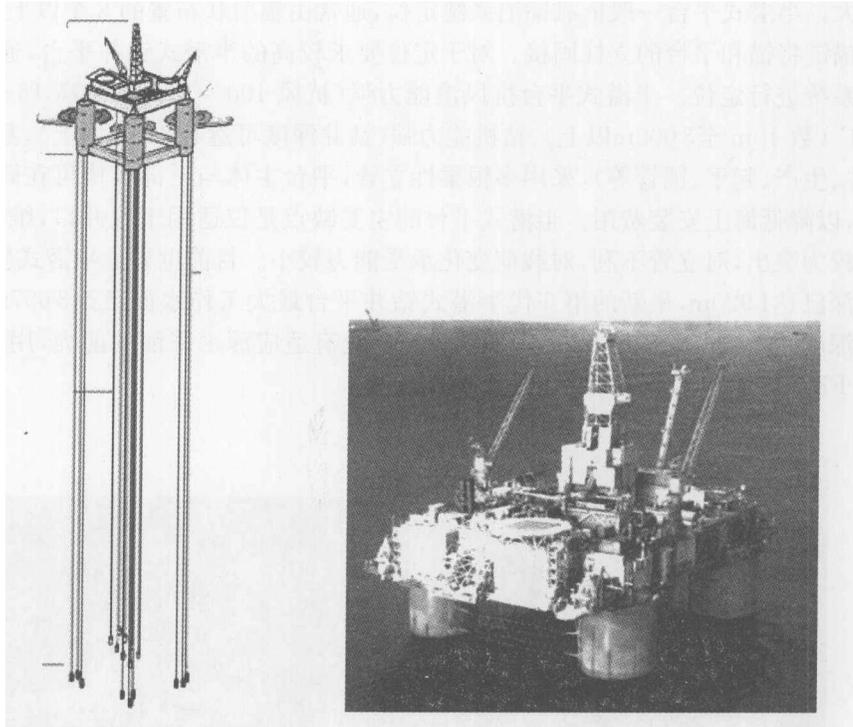


图 1-5 张力腿平台(TLP)

### 3. 单柱式平台(Spar Platform, 简称 SPAR)

单柱式平台的结构形式最初是一个大直径( $>25\text{m}$ )、深吃水(约  $200\text{m}$ )的圆柱体结构,柱内可以储油,称为传统 SPAR(Classic Spar),属第一代。Oryx 能源公司委托 McDermott 公司在美国墨西哥湾的 Neptune 油田成功建造安装了世界上第一座单柱式生产平台,当地水深  $588\text{m}$ 。第二代 SPAR 称为桁架式 SPAR(Truss Spar),在传统 SPAR 基础上缩短了圆柱的高度,取而代之的是增加桁架及重块,并在桁架结构上增加一些阻尼板以进一步改善 SPAR 的垂荡性能,当平台的储油能力要求不高时,这种结构更轻、运动性能和稳性更好,更为经济有效,因此成为目前最为主流的 SPAR 结构形式。为解决平台建造能力不足和避免长途运输以降低建造成本,2004 年,第三代多柱式 SPAR(Cell Spar)在墨西哥湾 Red Hawk 油田建成并投入使用,该平台采用多个小直径深吃水圆柱组合在一起代替原来的单个大直径圆柱构成平台主体。单柱式平台中部有系缆点通过多根锚缆锚固于海底,底部有立管连接到海底油井。SPAR 平台如图 1-6 所示。

SPAR 平台底部设置固定压载舱,以降低重心高度,使其低于浮心,因此稳定性极高;由于采用深吃水结构形式,所以波浪对平台主体底部的冲击力通常很小,而且垂向运动、横摇和纵摇的固有周期一般在  $20\text{s}$  以上,高于海浪特征周期,因此在波浪上的垂向运动性能较好。SPAR 平台的主要优点是可以采用干井口,易于采用刚性立管,对载荷变化承受能力较大,有利于后期侧置钻井。主要缺点是需要大型海上吊装船在平台现场海域安装上部模块,安装成本高。SPAR 平台被认为是一种特别适用于深海的海洋平台型式,适用水深范围从  $550\text{m}\sim 3000\text{m}$ ,目前最大工作水深为  $1710\text{m}$ 。

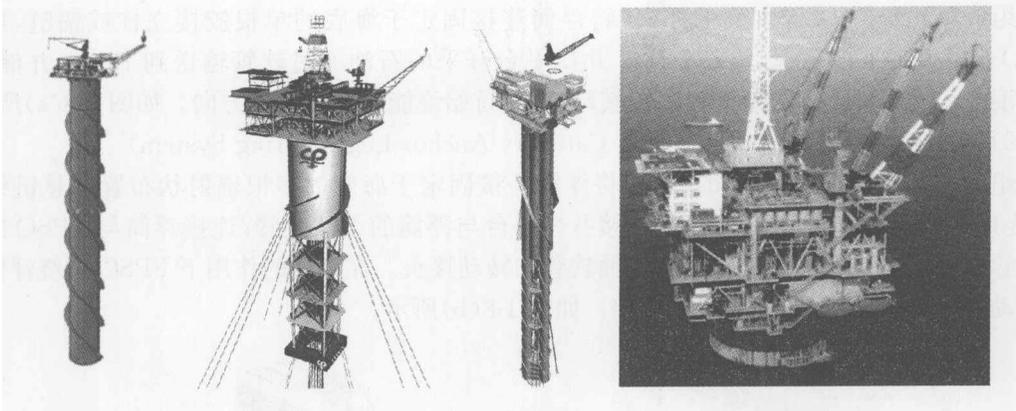


图 1-6 单柱式平台(SPAR)

#### 4. 浮式生产储油轮(Floating Production Storage and Offloading, 简称 FPSO)

FPSO 是集海洋石油天然气的生产、储存、外输,以及发电、供热、人员居住和生产指挥系统等多种功能于一体的海上大型浮式石油生产基地,通常由船体、生产设备、单点系泊系统、尾输油系统组成,与井口平台或海底采油系统组成一个完整的采油、原油处理、储油和卸油系统,如图 1-7 所示。在油田生产中,FPSO 接受并处理由海底管线输送来的井口平台的原油,处理合格的原油储存在 FPSO 的货油舱内,并定期通过尾输油系统输出到穿梭油轮,以确保整个油田的连续生产。FPSO 具有明显的优点:施工周期短,建造成本相对较低,各类装置均可在岸上全天候制造,易安装,易维修保养;应用水深范围大,作业海域水深从 20m~2000m;甲板面积大,可变载荷大,可以储存原油高达  $3 \times 10^5$  t;使用寿命长,移动灵活,可重复使用,拆迁费用低。



图 1-7 浮式生产储油轮(FPSO)

世界上第一艘 FPSO 于 1977 年由西班牙壳牌(Shell)公司投产于地中海 Castellon 油田。目前世界上工作水深最大的 FPSO 位于巴西 Seillean 油田,达 1 853m。FPSO 已成为当今海洋石油开发的主流设施,有百余艘遍布在世界各大洲海域服役,成为世界上拥有量最多、应用范围最广的海上浮式油气生产装置,占到世界所有海上浮式油气生产装置的 60%,超过所有其他类型的总和。

FPSO 的突出优点是具有风标效应,不管海上的狂风巨浪来自何方,都能以船首对准风浪的方向,从而使风浪对船体的影响(运动和受力)降至最低程度。为了获得风标效应,FPSO 通常采用单点系泊(SPM)系统进行定位。根据水深和环境条件的不同,目前发展的单点系泊系统有 4 种类型。

##### 1) 单锚腿浮筒系泊系统(SALM, Single-Ancor-Leg Mooring System)

组成单元包括:浮于水面的浮筒,将浮筒连接固定于海底的单根铰接立柱或锚链,连接 FPSO 与浮筒的系泊缆绳,输油软管。井口平台开采的石油通过软管输送到 FPSO 并储存。在风浪的作用下 FPSO 可绕浮筒自由转动,使船首始终能对准风浪的方向。如图 1-8(a)所示。

### 2) 悬锚腿浮筒系泊系统(CALM, Catenary-Anchor-Leg Mooring System)

组成单元包括:浮于水面的浮筒,将浮筒连接固定于海底的多根辐射状布置的悬链线锚链,连接 FPSO 与浮筒的系泊缆绳,连接井口平台与浮筒的柔性立管,连接浮筒与 FPSO 的输油软管。浮筒上装备有转动轴承及输油软管的转动接头。在风浪的作用下 FPSO 可绕浮筒自由转动,使船首始终能对准风浪的方向。如图 1-8(b)所示。

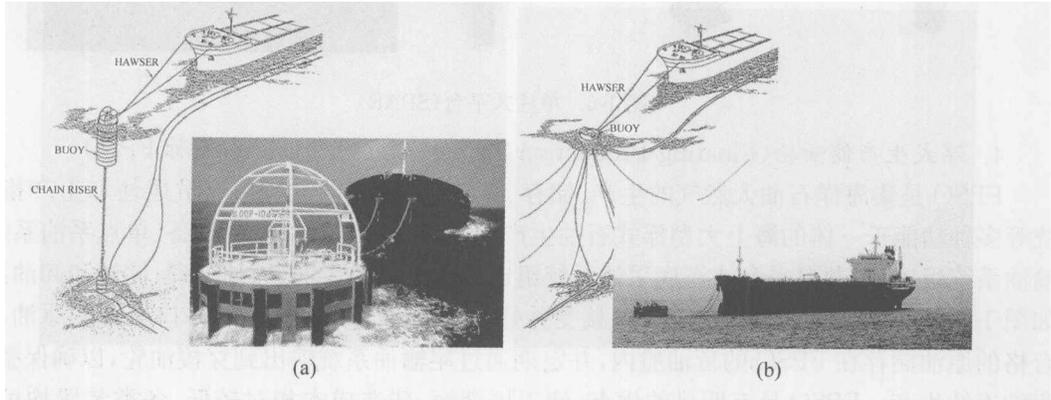


图 1-8 单锚腿和悬锚腿浮筒系泊系统

(a) 单锚腿浮筒系泊系统; (b) 悬锚腿浮筒系泊系统

### 3) 软刚臂系泊系统(Soft Yoke Mooring System)

软刚臂系泊系统适用于数十米以下的浅水油田,属大型永久式单点系泊系统。组成单元包括:固定塔架;绕塔架自由转动并依靠自身重量提供恢复力的软刚臂,包括 A 型软刚臂结构本身(简称 Yoke)以及内含的压载(或称配重);软刚臂和 FPSO 的连接机构,为吊杆或链条;FPSO 上的支撑机构;连接塔架和井口平台以及塔架和 FPSO 的柔性立管。如图 1-9 所示。钢结构塔架固定于海底,塔架上配备油气开采设施。软刚臂在塔架上与圆盘相接并可自由转动,该圆盘又可绕塔架的中心自由转动。软刚臂与 FPSO 的各个连接点都是万向铰式接头,可以

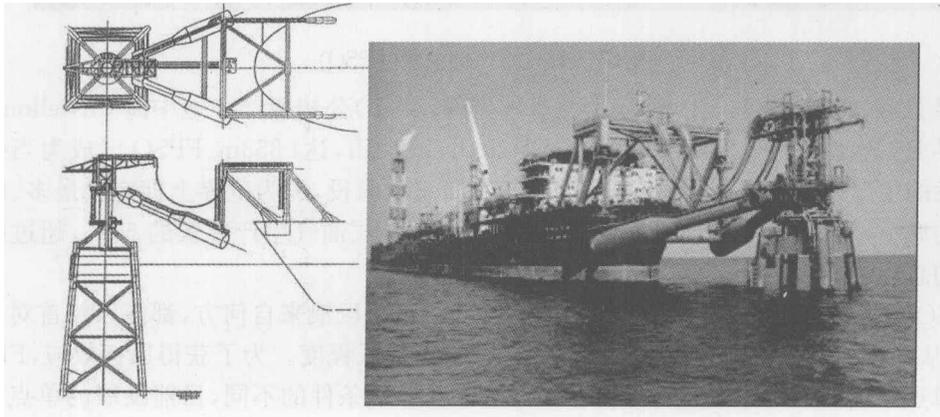


图 1-9 浅水软刚臂系泊系统

灵活地做三维空间运动。因此,FPSO 在风浪作用下可绕塔架自由转动,并使船首对准风浪的方向。

#### 4) 转塔式系泊系统(Turret Mooring System)

是悬锚腿浮筒系泊系统的发展,如图 1-10 所示。组成单元包括:内含转动轴承和立管转接头的转塔,将转塔连接固定于海底的多根辐射状布置的悬链线锚链,连接转塔与井口平台的柔性立管。在 FPSO 的某一部位布置一个舱室,将转塔包容固定。如果舱室布置在船体内部,则称为内转塔式(Internal Turret),反之则称为外转塔式(External Turret)。FPSO 与转塔外壳固定,通过转塔内部轴承可以自由转动,以产生风标效应。

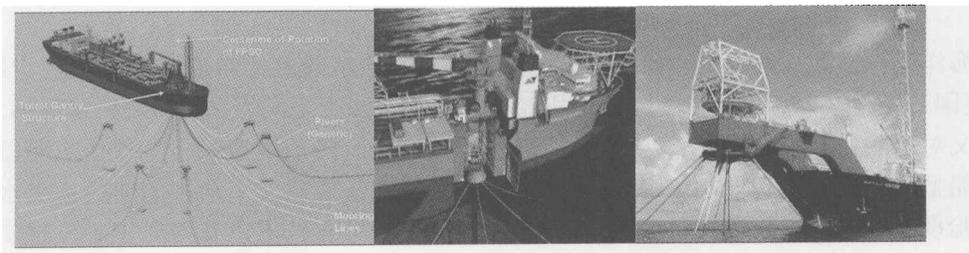


图 1-10 内转塔和外转塔式系泊系统

当然,FPSO 并不是全部都采用单点系泊系统定位。由于单点系泊装置的成本相对较高,在一些海况良好或者风、浪、流方向性很强的特殊海域,FPSO 也会采用较为便宜但不具有风标效应的散布式系泊系统(Spread Mooring System)定位,如图 1-11 所示。其组成单元包括:将 FPSO 连接固定于海底的多根辐射状布置的悬链线锚链,连接 FPSO 与井口平台的柔性立管。

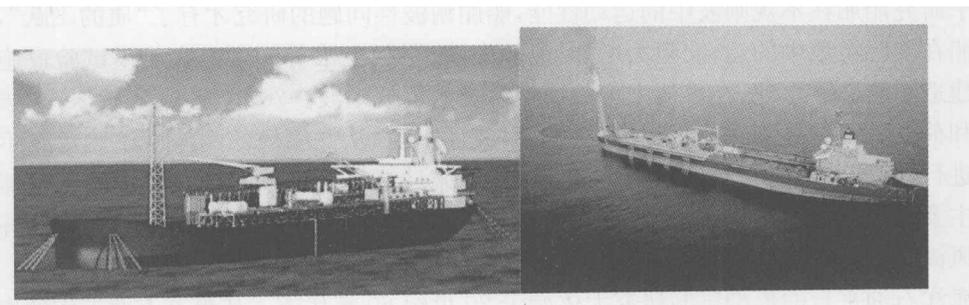


图 1-11 散布式系泊系统

# 第 2 章 海洋工程模型水动力试验研究 概述

## 2.1 模型水动力试验研究沿革

海洋工程模型水动力试验研究是在船模试验研究的基础上延伸拓展而来。19 世纪 60 年代,英国造船学家 W. Froude 首先提出用船模试验的方法决定实船在航行时所遭受的水阻力,以后又对船舶的推进、操纵以及横摇性能进行模型试验。由于模型试验对预估实船航行性能以及船型改进等方面有很大作用,欧美等造船先进国家纷纷建立了众多的船模拖曳水池及其他试验设施。为了交流各国船模试验研究的测试技术、分析技术以及探讨正确预报实船航行性能的方法等问题,于 1932 年成立了国际船模试验池会议(International Towing Tank Conference)并在荷兰召开了第一次大会。按照船舶航行性能的问题,共设置了船舶阻力、船舶推进、船舶操纵和船舶耐波性等四个专业技术委员会,总结和探讨了相关领域研究的进展。当时对船舶阻力、推进和操纵性能的模型试验都是在静水中进行的,其预报的有关性能也限于实船在静水中的航行情况。对于耐波性的研究主要是在规则波中横浪(横摇)和迎浪(纵摇、升沉)进行模型试验。直到 20 世纪 50 年代初,丹尼斯、皮尔逊等学者把平稳随机过程和线性迭加原理用于研究船舶在不规则波中的运动性能,船舶耐波性问题的研究才有了“质的飞跃”,其内容包括船在实际海浪中的运动、阻力增加、船舶失速、甲板上浪等问题。在船模试验设施方面则专门建造了耐波性水池,在水池中可以模拟海上的不规则波。20 世纪 50 年代末,美国泰洛试验池和荷兰试验池分别建成了相当规模的耐波性水池,从此船模的耐波性试验可在不规则波浪中进行,我国 702 研究所也于 20 世纪 60 年代末建成了耐波性水池。船模航行性能试验研究的主要设施是船模拖曳水池、空泡水筒、操纵性水池和耐波性水池,如果再配置循环水槽和低速风筒,则船模试验研究的设施更为完善。

海洋石油平台的模型试验研究大体始于 20 世纪 60 年代末。从事这方面工作的主要是船模试验研究单位。20 世纪 50 年代末,人们开始涉足海洋石油的勘探开采。首先在浅水区域发现了油田并进行油气开采,使用的是固定式海洋平台,设置于某一海域的油田长期从事生产作业,除需要了解风、浪、流的作用力以外,还要考虑平台是否上浪等问题。船模试验研究单位根据需要适时拓展至海洋工程领域,国际船模试验池会议相应地增设了海洋工程技术委员会。那时还没有专门的海洋工程水池,只能利用原有设施分别进行试验研究,例如:将固定平台模型的水下部分在拖曳水池中试验测定阻力以得到流对平台的作用力;水上部分在风筒中试验或将其倒放在水池中进行拖曳试验以得到风对平台的作用力;把平台置于耐波性水池中试验以得到波浪对平台的作用力以及观测平台甲板的上浪。综合上述分别测得的作用力便算是风、浪、流对平台总的的作用力,忽略了风、浪、流之间的相互影响作用。此外还在拖曳水池或耐波性水池中进行导管架驳运过程中的模型试验和导管架下水过程中的轨迹、姿态、就位定点等模型试验研究。随着油气开发向深水海域的扩展,发展了各种类型的浮式海洋平台,需要试验

研究的问题较固定式平台更为复杂。除风、浪、流对平台的作用力外,还需研究浮式平台在风、浪、流作用下六个自由度的运动,锚泊定位系统悬链线的运动和受力问题,立管的运动和受力问题。开头也是使用原有的船模试验设施分别进行试验再予以综合考虑,或进行理论和经验估算相关问题后再予以综合考虑。人们对于这种处理方法的正确程度有很大的疑虑。例如平台本身在风、浪、流作用下的六自由度运动受到锚泊线、立管等牵制,而锚泊线、立管等运动和受力也受到平台运动的限制。实际上,平台、锚泊线、立管等是一个统一的系统,利用原有船模试验设施分别研究再进行综合考虑,对于它们之间的相互作用很难分析清楚。于是在20世纪70年代考虑建立专门适合于海洋平台模型试验的水池,称为海洋工程水池或风浪流水池。20世纪80年代初挪威率先建成了这种水池,能够模拟风、浪、流等海洋环境条件,水池的最大水深为10m,配置大面积的假底,借升降假底可以正确模拟海洋平台的工作水深,以后其他国家陆续建成了一些海洋工程水池。我国于1985年在上海交通大学筹建海洋工程国家重点实验室,设计建造的海洋工程水池于1991年底投入使用。在20世纪80年代,海洋石油的开采虽已进入深水海域,但水深不过几百米,因此石油公司和国际海洋工程界对于实际工程项目的模型试验缩尺比习惯上以60~80为宜,模型以尽可能大者为佳。以后又发展了张力腿平台,水深较小的海洋工程水池在池底中央专门设置深井,平台的牵索和立管可布在深井底部。随着各类海洋平台设计、建造的需要,模型试验研究的任务日趋繁忙,各种仪器设备、试验测试技术、数据采集和分析技术都有很大的进展。

进入21世纪,石油开采迅速向深海发展,深海平台技术成为国际海洋工程界的热点。目前已有工作水深超过3000m的深海平台投入使用,如何对深海平台进行合理的模型试验就成为倍受关注的问题。为了适应深海平台模型试验研究的需要,有些国家建造深水海洋工程水池,例如荷兰试验池于2000年建成了当时号称世界上最先进、最深的海洋工程水池。其后,日本、巴西等国也建造了深水海洋工程水池,我国正在上海交通大学筹建深水海洋工程水池,计划于2007年建成并投入使用。

建造深水海洋工程水池,部分地解决了深海平台模型的试验研究问题,但从根本上说来,并未全部解决问题。如果按照传统的物理模型试验方法,要把深海平台及其系泊锚链线和立管等模型全部布置在水池中是不可能的,因为水池的尺度总是有限的。为此,国际船模试验池会议(ITTC)进行了专门的讨论,以寻求解决问题的途径,不少学者致力于深水海洋平台模型试验技术的研究,有关这方面的内容,将在本书第9章中作专题介绍。

## 2.2 模型试验对船舶及海洋平台科技进步的作用

利用模型试验对船舶航行性能的研究已有150多年的历史,对海洋平台在风、浪、流联合作用下的运动及载荷等问题的研究也有近50年的历史。模型试验研究对于正确预报实体的水动力性能、设计具有优良水动力性能的实体,乃至促进船舶与海洋工程流体力学学科的发展等方面,都有十分重大的作用。就具体的实际工程问题而言,首先需要能够比较正确地预报实体的性能(船舶流体力学中常称为正问题),其次需要设计性能优良的实体(常称为反问题或设计问题)。这就需要为优化设计提供足够的资料,借以保证设计性能优良的实体。

在20世纪60~70年代以前,模型试验几乎是解决问题的唯一手段,因为那时的船舶流体力学理论尚未达到比较完善的地步,同时也缺乏有力的计算工具,用理论计算的手段来解决问

题尚不具备条件。以船舶阻力为例:决定实船阻力最可靠的办法是根据船模阻力试验的数据换算至实船,设计低阻力船型也是靠多个方案船型的模型试验数据比较而定,至于为优化设计低阻力船型提供足够的资料,则完全是依靠大量的船模系列试验来实现。因此,从20世纪30~40年代起,许多船模试验研究机构进行了大量的船模系列试验,国际上比较著名的船型有美国泰洛水池的Todd系列,英国的BSRA系列、瑞典的SSPA系列、英国NPL的高速艇系列。在船用螺旋桨方面,荷兰船模试验池从1940年起以十年左右的时间完成了Troost B型螺旋桨系列,日本则发表了MAU螺旋桨系列。在船用舵方面,美国发表了NACA对称剖面的流线型舵系列。正确选用这些系列资料,不仅可以设计出航行性能比较优良的船舶,而且还能比较正确地预报新船的航行性能。更有不少研究人员,在分析总结大量船模试验研究资料的基础上,提出了许多经验公式和各式图谱,既可用于预报新船的航行性能,又可作为决定新船主要参数和线型的依据。现行的船舶阻力教科书中,有关阻力分类、降低各种阻力成分的措施、有效马力预估、船型参数对阻力的影响等内容,大多来源于对船模阻力试验研究资料的科学总结。由此可见,模型试验在历史上对改进船舶航行性能、发展优良船型以及促进船舶流体力学学科的发展等方面都作出了巨大的贡献。海洋平台模型试验研究的历史虽然较短,但在早期也是主要依靠模型试验来确定海洋平台在风、浪、流联合作用下的运动性能及载荷,至于海洋平台的选型、多方案的优化设计比较等则更是依靠模型试验来确定。

20世纪70年代以后,随着电子计算机的普遍应用,流体力学理论本身的不断充实发展,形成了计算流体力学(CFD)这一学科分支,解决工程实际中的数值计算问题,各种计算软件乃至有关船舶与海洋工程流体力学专用软件包的问世,用理论计算的手段来解决实际问题,已具备了相当的条件。尽管各类新型船舶和海洋平台不断涌现,但是基本上已不再像过去那样花费巨大的财力物力和人工进行大量的模型系列试验研究。这是因为应用理论计算再加上优化理论、专家系统及人工智能等手段,可以完成新船或新型海洋平台设计的多方案比较和选优问题。因此,现时新型海洋平台或新船的方案比较和优化设计的工作基本上已由理论计算来完成,模型试验已不再担任这方面的任务。但决不能由此认为模型试验研究已成可有可无或不起什么作用。诚然现时已有多种软件可以计算海洋平台在给定海洋环境条件下的运动及受力问题,大多数计算结果和模型试验结果比较符合,但由于理论计算中常引入诸多假定或经验数据,导致有些数据的符合程度欠佳。就具体的工程项目而言,船舶及海洋工程界对于理论计算的结果并不完全放心,他们总是相信物理模型的试验结果,并以此来作为设计、建造的依据。

从目前的实际情况来看,理论计算和模型试验是相互依存,共同促进船舶与海洋工程流体力学学科的发展,为解决工程实际问题提供更正确、完善的科学依据。理论计算的结果是否正确,都要用模型试验的结果来验证,分析符合程度欠佳的原因所在,修正理论中的假定或经验数据,使之更符合实际,因此模型试验对促进理论计算的发展有重要作用。模型试验研究也并非十全十美,相似理论中的粘性相似(即模型和实体的雷诺数相等)问题,长期困扰物理模型试验结果换算至实体的正确性,则有赖于粘性流体力学理论指导予以妥善解决。因此理论计算对模型的试验技术和分析技术的发展也有重要的作用。概括来说,对于具体的工程项目,在初始阶段优化选型和多方案比较由理论计算方法在计算机上完成,设计方案一旦确定,则进行模型试验并以此作为修改设计和实际建造的依据。

一般而言,模型试验的主要目的通常包括:

(1) 预报海洋工程结构物的运动与载荷,验证理论(数值)预报结果,对设计方案的技术性

能进行认证。

(2) 获得理论难以预报的非线性水动力特性,发现任何不可预知的动力行为、运动与载荷以及其他未知物理现象。

(3) 提供海洋工程结构物在安装和作业过程中行为特性的可视化证明。

## 2.3 国外海洋工程水池

海洋平台模型水动力试验研究的主要设施是海洋工程水池,俗称风浪流水池。实际海洋平台是定位于某一特定水深海域进行生产作业,在风、浪、流的联合作用下,浮式平台产生六个自由度的运动和受到海洋环境的动力载荷。比较完备的海洋工程水池必须能够模拟复杂的海洋环境,即水深、风、浪、流等环境要素,而且产生风、浪、流的能力要足以模拟海洋平台生存条件(百年一遇)的海况。

海洋工程水池的发展大体经历了两个阶段,第一阶段是20世纪90年代以前建造的普通海洋工程水池,第二阶段是20世纪末21世纪初设计建造的深水海洋工程水池。

20世纪70年代,荷兰MARIN将浅水船模试验池进行适当改造后用于海洋平台的模型试验。水池长220m,宽15.8m,可以在一定范围内调节水的深度,在宽度方向配置推板式造波机,可以产生规则波或不规则波,最大的有义波高为0.3m,另外再配置了可移动式的造流、造风系统。实际上该水池在水深、造流、造风及长宽尺度比例等方面有许多局限,并非真正意义上的海洋工程水池。尽管如此,荷兰的水池在海洋工程模型试验研究方面做了大量研究工作,在国际海洋工程界享有很高的声誉。

挪威MARINTEK于20世纪80年代初建成的海洋工程水池是第一阶段中最为先进、最具有代表性的水池。水池长80m,宽50m,水深10m,大面积的可升降假底可使试验的水深在0~10m间任意调节。在池宽方向一侧配置双推板造波机,规则波的最大波高可达0.9m,也可制造长波峰的不规则波。在池长方向的一侧配置了多单元(144个)单推板蛇形造波机,规则波的最大波高为0.4m,可以制造任意方向的长波峰或短波峰的不规则波。大功率的造流系统在水池中可进行稳定的整体造流,水深5m时的最大流速为0.2m/s,水深7.5m时的最大流速为0.15m/s。造风系统可产生定常风或不规则风,定常风的风速可达12m/s以上。因此,挪威海洋工程水池能够全面地模拟各种海洋环境条件,包括风、浪、流及水深等试验条件。

加拿大海事动力研究所(Institute for Marine Dynamics)在Newfoundland建成的海洋工程水池长75m,宽32m,深3.5m,在水池中央设置的方形深井长4.0m,宽4.0m,深5.0m。在池宽方向设置了52个多单元推板蛇形造波机,在池长方向设置了116个多单元推板蛇形造波机(呈L形、共168个单元的造波装置),可制造长波峰规则波和长波峰或短波峰的不规则波。规则波的最大波高为0.8m,不规则波的最大有义波高为0.5m。造流装置是功率为 $1000 \times 735.499$ 瓦(W)的可循环整体造流系统,水流的速度与试验的水深有关。可移动的造风系统由12个风扇组成,离风扇距离10m处的最大风速为12m/s。

上述各家海洋工程水池都能模拟风、浪、流等环境条件,除配备造波机外,在造波机的对岸池壁处都装有消波装置,用以消除波浪抵达对岸后池壁的反射作用。

随着海洋油气开采向深海拓展,新型深海海洋平台不断涌现,如按常用的缩尺比进行模型试验研究,上述各家水池由于水池尺度,特别是水深的限制,已很难满足深海海洋平台试验的

要求。为了解决这方面的需要,除在实验技术等多方面进行探讨之外,国际上还建造了一些深水海洋工程水池。最早建成的是美国 OTRC 海洋工程水池,其后,荷兰 MARIN 于 20 世纪 90 年代筹划,并于 2000 年建成世界上最先进、最具有代表性的深水海洋工程水池,日本、巴西也建造了深水海洋工程水池。

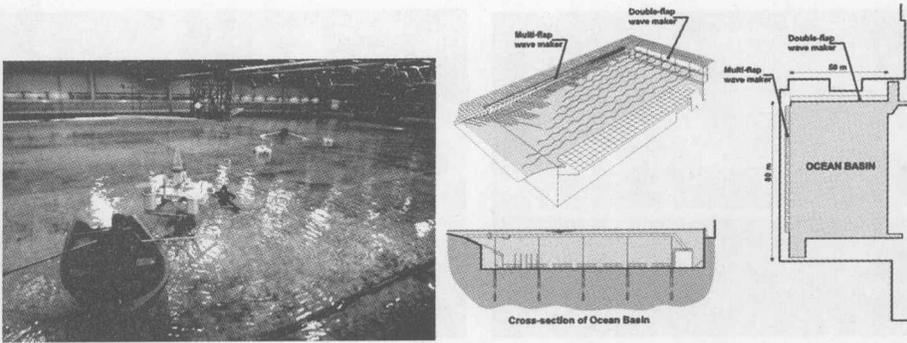
位于美国休斯敦的 OTRC(Offshore Technology Research Center)水池由水池主体和一个深井组成。水池主体长 45.7m(150ft)、宽 30.5m(100ft)、最大工作水深 5.8m(19ft),水池中央设置的方形深井长 9.1m(30ft)、宽 4.6m(15ft)、最大工作水深 16.8m(55ft)。在池宽方向配置了多单元(48 个)单推板蛇形造波机,可制造规则波和长波峰或短峰波的不规则波,最大波高可达 0.9m。造流采用复合的可移动式局部造流系统,可在模型试验范围形成稳定的局部流场,最大流速为 0.6m/s。该系统可沿任何方向置于不同的水深处,因此,可以产生与波浪成任意方向的水流。造风是由 16 个风扇组成的可移动式局部造风系统,最大风速为 12m/s。该造风系统可沿任何方向安置,能使风的方向与波浪形成任何所需的夹角。

荷兰 MARIN 深水海洋工程水池的主体长 45m、宽 36m,大面积假底可在 0~10.5m 之间任意调节试验水深,水池中设有直径为 5m 的圆形深井,最大工作水深可达 30m。依靠假底的调节,可使试验水深在 0~30m 之间任意变化。在水池的长度和宽度方向(俗称 L 形)都配置了多单元推板式蛇形造波机,能产生任意方向的长波峰或短波峰的波浪,最大有义波高为 0.4m。在水池的另外两侧除设置通常的消波滩外,在造波机的推板上还配置了能够主动控制波浪反射的消波装置。造流系统在水池主体的高度方向设有 6 层造流装置,可分层造流,调节各分层造流装置即可得到所要求的流速沿水深的分布。最大造流速度为 0.5m/s(水表面处)和 0.1m/s(池底、水深 10.5m 处)。造风系统是在 24m 宽的构架 on 布置轴流风机组所组成。可产生定常风或由风谱规定的非定常风场,最大风速为 12m/s。由于构架为可移动式,能使造风的方向与浪向成任意的夹角。

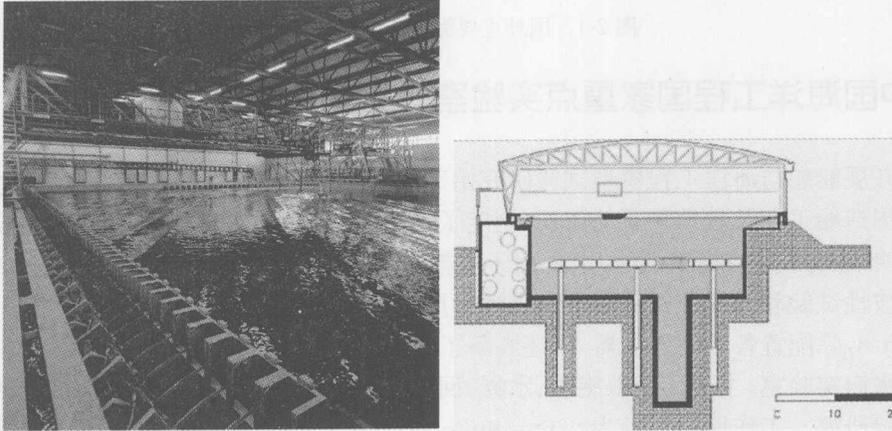
日本国家海事研究所于 2001 年建成的深水海洋工程水池是圆形水池,形状和配置比较奇特,与通常的海洋工程水池不同。水池主体的有效直径为 14m,水深 5m。水池中央设置直径为 6m 的圆形深井,最大工作水深可达 35m。在深井部分设置了可移动的假底,依靠假底的调节,可使实验水深在 5~35m 之间任意变化。在水池的外圈圆形池壁上,配置了 128 个单元的推板式蛇形造波机,能产生规则波和不规则波,最大波高为 0.5m。水池中配有局部造流系统,在水池中央 1m 范围内最大的流速为 0.2m/s。

巴西 LabOceano 深水海洋工程水池位于里约联邦大学,于 2003 年建成。水池主体长 40m、宽 30m、水深 15m,水池中央设置了直径为 5m 的深井,水深 25m。水池主体和深井部分分别配置假底,可在 2.4~14.85m 范围内任意调节水池主体试验水深,在 15~24.65m 范围内任意调节深井的试验水深。在水池的宽度方向配置了 75 个单元的推板式蛇形造波机,能产生的最大波高为 0.52m(规则波),最大有义波高为 0.3m(不规则波)。待建的整体造流系统在水池主体高度方向设置六层造流装置,调节各分层的造流装置可得到所要求的流速沿水深的分布,最大流速为 0.25m/s(表面处)和 0.1m/s(底部)。造风为 16 个风扇组成的可移动式系统,能产生定常风和非定常风,最大风速为 12m/s。

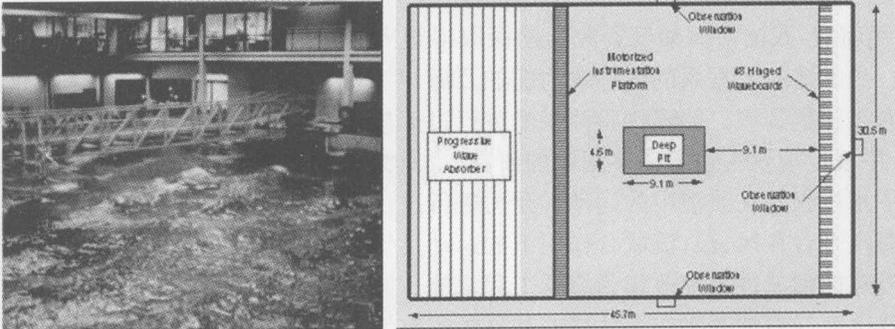
图 2-1 中给出的一组照片,大体反映了国际上有关海洋工程水池的概貌。



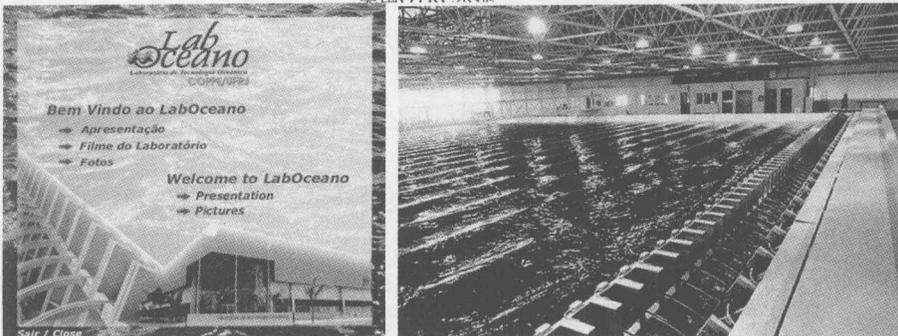
挪威MARINTEK水池



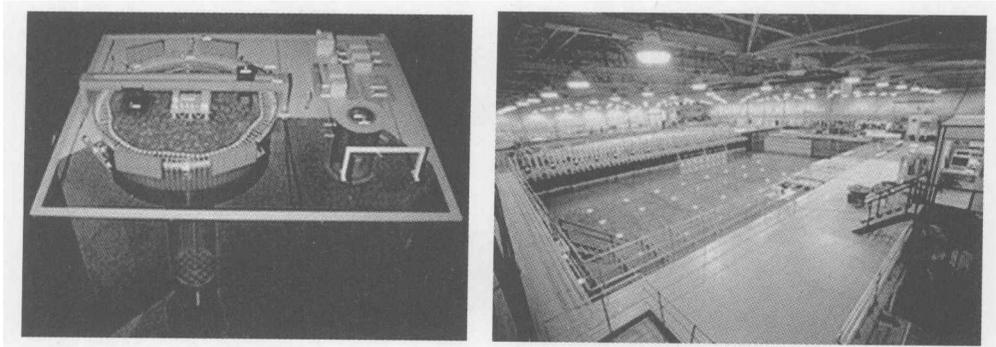
荷兰MARIN海洋工程水池



美国OTRC水池



巴西LabOceano水池



日本NMRI水池

加拿大CHC水池

图 2-1 国外主要海洋工程水池一览

## 2.4 中国海洋工程国家重点实验室

我国开展船舶与海洋工程模型试验研究始于 20 世纪 50 年代。早在 1955 年,上海交通大学根据我国造船工业及教学科研的需要,制定了船舶流体力学的实验研究基地的建设规划。

1958 年建成了船模拖曳水池,主要用于船模阻力、螺旋桨敞水、船模自航试验,也可进行部分的耐波性试验和操纵性试验研究。水池的尺度为长 110m、宽 6m、水深 3m,拖车的最大速度可达 6m/s,除配置各类测试仪器外,还装备了冲箱式造波机,最大波高为 0.3m。1978 年建成了空泡水筒实验室,主要用于螺旋桨、水翼、回转体等水动力性能、空泡、噪声以及螺旋桨激振力等试验研究。工作段的直径为 0.6m,长 2m,最大水流速度为 15m/s,最低空泡数为 0.2,除配置各类测试仪器外,还配备了模拟轴向伴流场的装置。

1980 年前后,我国沿海油气资源的勘探取得很大的进展,大力开发海上油气资源已成为必然趋势。交大造船工程系的名称改为船舶及海洋工程系,在人才培养和科学研究方面从船舶拓展至海洋工程领域。船模试验池虽然进行过船模在规则波中迎浪、顺浪及横浪情况下的摇摆运动、甲板上浪及失速等诸多问题的研究,也对海洋工程方面的海洋浮标、固定平台导管架运输和下水过程等在波浪中的运动和受力进行过一些试验研究。但是船模试验池显然没有条件进行海洋平台在风、浪、流联合作用下的运动及受力等试验研究。于是该系考虑将原先规划中准备筹建的耐波性水池改建为海洋工程水池。

鉴于我国海洋石油开采在人才培养和科学研究的迫切需要,国家于 1984 年酝酿筹建海洋工程国家重点实验室,上海交大船舶流体力学研究室提出申请,要求将国家重点实验室建在上海交大,并及时完成了海洋工程水池的方案论证和初步设计工作。国家委托教育部聘请专家对海洋工程实验室的建设规划进行评议并实地考察。根据专家的评议意见,国家于 1985 年 7 月正式批准并拨款建造海洋工程水池。水池于 1992 年建成并通过国家验收,1993 年由国家教委正式批复对外开放。

在筹建海洋工程水池的 20 世纪 80 年代初期,我国都是在浅海区域(渤海湾、北部湾)进行油气开采。在决定水池的主尺度时,假定模型的缩尺比为 1/60,开采我国海南岛南端水深 300m 区域的油气资源,因而水池的最大工作水深定为 5m。进入 21 世纪,海洋油气资源的开发不断向深海拓展,国际海洋深水工程领域的研究迅猛发展。我国海洋油气的开采也开始进入深水海域,现有的海洋工程水池显然已经不能满足深海海洋平台试验研究的需要。2004

年,为适应我国海洋油气资源开发向深海发展的需要,为推进我国的海洋深水工程研究,国家批准在上海交通大学新建我国首座海洋深水试验池。深水试验池已于2005年开工建设,预计在2007年建成。该水池可模拟深达4000m的水深,可模拟各种复杂的风、浪、流等海洋环境。

上述海洋工程水池和建设中的海洋深水试验池的情况简要介绍如下。

### 1. 海洋工程水池

海洋工程水池的主要尺度为长50m、宽30m、深6m,能够模拟风、浪、流等各种海洋环境条件,如图2-2所示。主要装备有:

(1) 大面积(28m×26m)可升降的假底,可使试验水深在0~5m范围内任意调节。

(2) 双推板大功率液压造波机。可以产生规则或不规则的长峰波,最大波高为0.5m。造波机的对面设有消波滩,用以消除波浪的反射。

(3) 高压喷水整体造流系统,可以产生与波浪同方向的水流或横向的水流,两者组合可形成斜向的水流,最大流速为0.2m/s。并配有局部造流装置,以供较高流速试验的需要。

(4) 可移动式的轴流式风机造风系统,能产生均匀风速或非定常风速(风谱),最大风速为10m/s。与造波机、造流系统配合,既可产生同方向的风、浪、流,也能产生不同方向组合的风、浪、流。

(5) 横跨水池(30m)配有大跨度XY方向拖车,最大速度为1.0m/s。

(6) 各类测试仪器和数据自动采集及实时分析系统。

海洋工程水池主要从事各类海洋石油平台在风、浪、流作用下的流体动力载荷、运动及结构响应的实验研究,也可进行船舶及海洋工程结构物在水下、运输、定位、安装过程中的技术问题、港口码头及其桩柱的水动力载荷等各方面的实验研究。

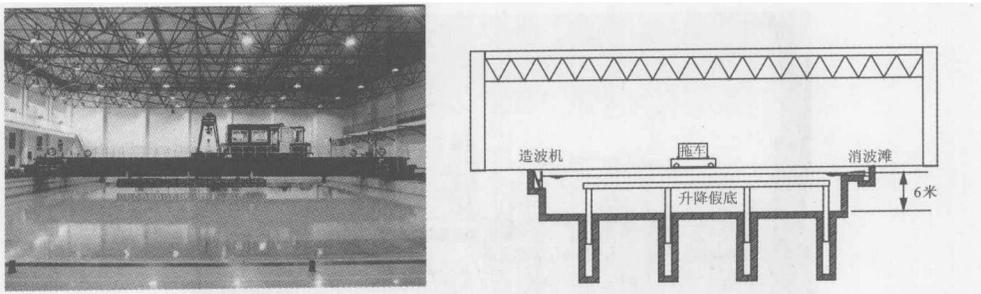


图2-2 上海交通大学海洋工程水池

### 2. 海洋深水试验池

海洋深水试验池由水池主体和一个深井组成。水池有效工作尺度为:长度50m,宽度40m,最大工作水深10m。深井直径5m,最大工作水深40m。深水试验池与现有海洋工程水池以及国外主要海洋工程水池的比较情况如表2-1所示。

表2-1 国内外主要海洋工程水池尺度

所在国家	水池主体			深井	
	长/m	宽/m	深/m	直径/m	深/m
巴西	40	30	15	5	25
荷兰	45	36	10.5	5	30

(续表)

所在国家	水池主体			深井	
	长/m	宽/m	深/m	直径/m	深/m
挪威	80	50	10	—	—
美国	45	30	5.8	—	16.8
加拿大	36	26	3	6	14.8
日本	14	14	5	6	30
中国	50	30	6	—	—
中国在建	50	40	11.5	5	40

水池具备模拟4000m水深的深海工程试验能力,并装备有模拟风、浪、流等各种复杂海洋环境的大型试验设施。主要装备有:

(1) 水深调节系统:大面积可升降假底(50m×40m)能使水池主体水深在0~10m间按需要任意调节,深井假底可使深井工作水深在0~40m间调节。

(2) 造波系统:沿水池相邻两边安装有两组垂直布置的多单元造波机,可产生长峰波或短峰波,最大有义波高可达0.3m。

(3) 消波系统:在两组造波机的对岸都设有消波滩,借以吸收波能而防止产生波浪反射。

(4) 造流系统:外循环式造流系统,可在整个水池中产生所需剖面的水流,造流深度0~10m,水池整体最大均匀流速0.1m/s。

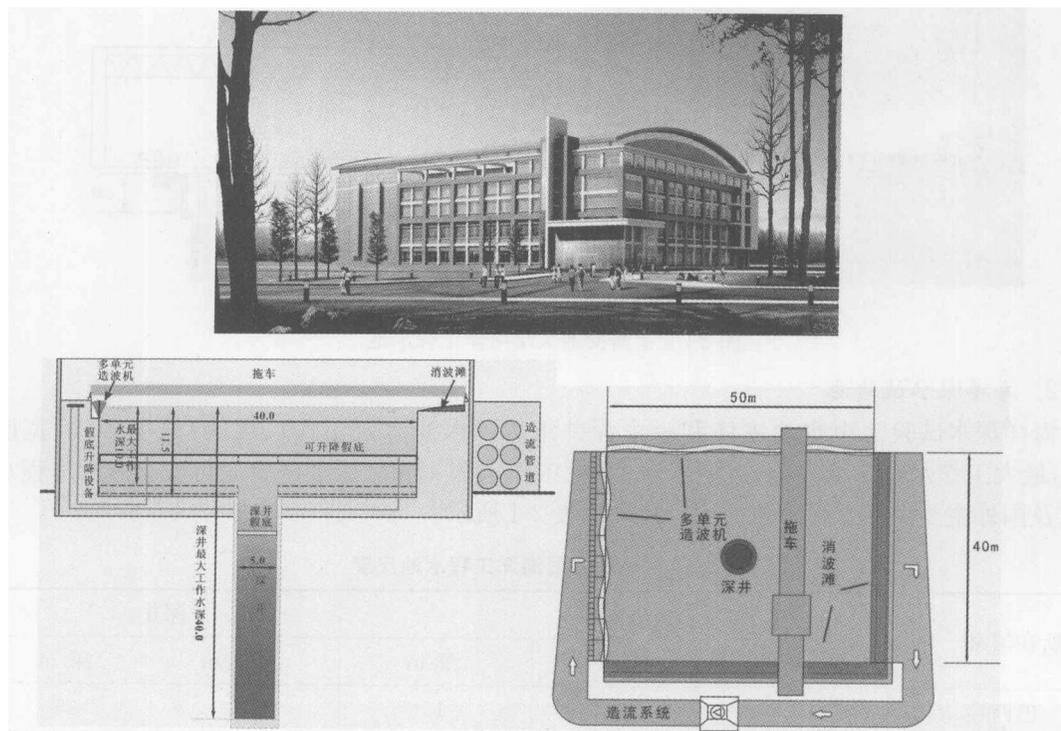


图 2-3 上海交通大学海洋深水试验池(建设中)

(5) 造风系统:配备移动式造风系统,可产生任意方向的定常风或风谱(非定常风),最大风速可达 10m/s,最大风区宽度 24m。

(6) 拖车系统:横跨整个水池配有大跨度 XY 方向拖车,最高速度 1.5m/s。

海洋深水试验池具备再现大范围飓风、三维不规则波、各种奇异波浪、多分层海流等深海复杂环境的能力;具备模拟船舶及海洋工程结构物在深海环境中出现的各种力学过程和工程现象的能力;具备测量分析试验对象在深海环境条件作用下载荷、运动、结构动力响应等能力。主要承担的试验任务包括:开展船舶及海洋工程结构物在深海环境中试验研究,完成相关新装备的研发设计和性能验证工作;开展石油、天然气、多金属结核等深海资源开发工程的模拟试验,为深海资源的开发利用提供技术保障;开展深海潜水器、水下管线铺设与检修等技术的研发,为深海物理研究、深海环境保护等方面提供技术支持。

图 2-3 为上海交大正在建设中的海洋深水试验池示意图。

## 2.5 海洋工程水池的主要试验设施

从上述介绍可知,水深调节系统、造波系统、造流系统、造风系统是典型海洋工程水池必备的四大主要试验设施,直接代表了该水池的模型试验能力。

### 2.5.1 水深调节系统

海洋工程结构物的工作水深大小不一,跨越相当大的范围,浅至几米、数十米,深则可达 3000m 以上。因此,水池的工作水深应根据具体海洋工程模型试验的要求,模拟不同水深的海域环境条件。

目前,国际上主要的海洋工程水池均采用大面积可升降的假底对水深进行调节。假底一般由钢材、玻璃钢或混凝土制作的浮箱连接组合而成,其在水中的浮力略大于自身重量。假底的上下升降调节方式如图 2-4 所示,在假底下部安装多根钢缆,通过安装在池边的多个空压卷扬机装置调节钢缆长度来实现假底的上下移动,从而达到调节水深的目的。

除大面积的可升降假底外,在先进的海洋工程深水试验池中央通常还设有深井,用于模拟垂直系泊的深水浮式结构,如张力腿平台等。与大面积的可升降假底类似,在深井处也设有可升降的假底,用于调节深井处的水深大小。深井假底的升降调节方式与大面积假底基本类似。

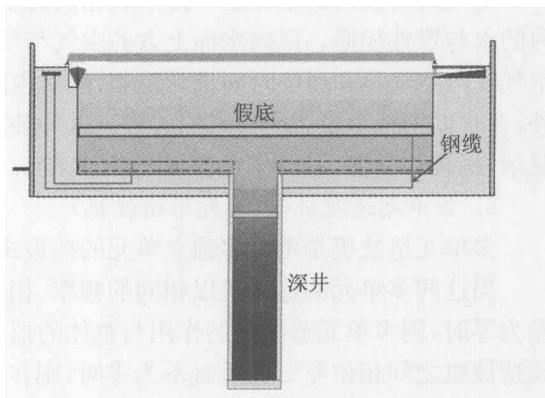


图 2-4 海洋工程水池假底结构示意图

### 2.5.2 造波系统

海洋工程水池造波系统的核心装置是造波机,其式样众多。以下为常见的几种造波机。

#### 1. 冲箱式造波机

冲箱式造波机的主体部分是一个略呈楔形的箱形结构。面向水域的一面呈抛物线形,背

面是一垂直平面。驱动机构带动冲箱在水面上下运动,使冲箱抛物线前方的水面抬高或下降,在水面上形成波浪。调节或控制冲箱上下运动的幅值和周期(频率),可以产生不同波高和波长的波浪。冲箱式造波机的结构简单,维修方便。它的缺点是,在运行过程中通常只能调频而不能调幅,且其本身惯量大,因此消耗的功率也较多。

### 2. 推板式造波机

推板式造波机也称为活塞式造波机,主要应用于浅水造波。通过连杆驱动设在水池(水槽)一端的活塞进行往复运动,使池中的水产生波动,形成波浪。调节或控制活塞往复运动的冲程、速度和周期(频率),可以产生不同波高和波长的波浪。

### 3. 摇板式造波机

摇板式造波机的主体部分是一框架式板块结构,其下缘与固定支座铰接。在驱动机构带动下,造波板绕支座上的铰接点作往复摆动,使板面前方的水抬高或下降,在水面上形成波浪。调节或控制摇板的摆幅和周期(频率),可以产生不同波高和波长的波浪。摇板式造波机的结构简单,质量较小。采用液压传动机构,既可调频,又能调幅,用于造不规则波比较方便。

上海交通大学海洋工程水池所使用的摇板式造波机是由液压传动机构驱动的双摇板式造波机,如图 2-5 (a)所示。它由上、下两块造波板组成。一块板完全浸没于水中。其下缘与固定基座相连接,并可绕基座上的支点作往复摆动。它的上缘则构成另一块造波板的基座。上板可以绕下板的上缘支点作往复摆动。用计算机按一定程序控制上下两板的驱动机构,两板即按给定的各自规律运动,在水面上形成所要求的复杂波形。双摇板式造波机的缺点是它的水下部分不易维修,且造波机需要占用水池一段较长的长度。

### 4. 空气式造波机

空气式造波机的主体是一排形式相同的空气罩。它们的下端是一个浸入水中的开口。罩内的水与罩外相通。罩内水面上方的空气与气泵相连。空气泵启动后,利用阀门控制系统对空气室内空气量和通气时间进行控制,使罩内的水面压力大小和作用时间发生变化,传递到罩外,在水面上就形成了所要求的波浪。这种装置的特点是能够调频调幅。但是控制系统比较复杂,消耗功率多,造价昂贵,因此应用较少。

### 5. 多单元造波机(也称蛇形造波机)

多单元造波机是由许多独立单元的摇板式造波机组成,如图 2-5 (b)所示。

当这些多单元的造波机以相同的频率、相同的摆幅往复运动,且各单元造波机之间的相位差为零时,则多单元造波机的作用与整体的摇板式造波机相同,所造的波即为长峰波。若各单元造波机之间相位差  $\varphi$  相等且不为零时,则在水面造出的是与造波机板面构成一个  $\beta$  角的斜波。造波机与所造成的斜波之间有如下关系:

$$\lambda\varphi = 360 \times b \times \sin\beta \quad (2-1)$$

式中: $\lambda$  为波长; $b$  为单元造波机的板宽; $\beta$  为波峰线与造波机基线之间的夹角。

造波机单元的板宽  $b$  应满足:  $b < \frac{\lambda_{\min}}{\sqrt{2 + \sin\beta}}$ 。

各造波机单元组成的总宽度是由最大传播角为  $\beta$  时能保证一定范围的试验区域来确定的。

多单元造波机的优点是能造出斜波与三维短峰波,但其控制系统比较复杂,造价昂贵,并且造波的极限波长会因单元造波机板宽而受到限制。目前,国际上先进的海洋工程水池,如荷

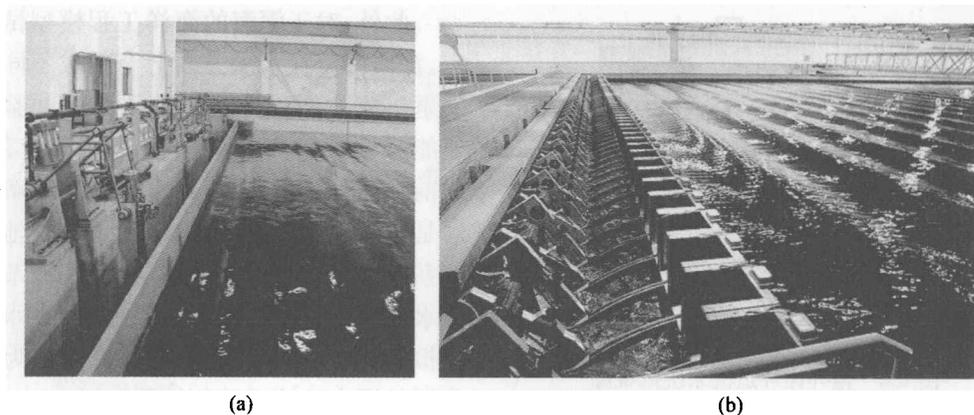


图 2-5 海洋工程水池的造波机  
(a) 双摇板造波机; (b) 多单元造波机

兰的 MARIN 海洋工程水池、巴西的 LabOceano 深水池、我国在建的海洋深水试验池等,均采用的是多单元造波机。

### 2.5.3 造流系统

海洋工程水池的造流系统应能模拟各种海流。目前,国际上海洋工程水池的造流系统有池内循环、假底循环与池外循环三种形式。

池内循环形式的造流系统结构简单,使用较为方便,因此为目前许多海洋工程水池所采用。该造流系统通过在水池内布置可移动的局部造流装置,在造流装置上均匀分布若干高速水流喷口,从而在水池的试验区域内形成均匀稳定的流场。局部造流装置可沿任何方向置于水池内不同水深处,能产生与波浪成任意方向的水流。调节造流装置水泵的转速,可以模拟不同流速的海流。美国 OTRC 海洋工程水池、日本国家海事研究所的海洋工程水池等均采用的是池内循环形式的造流系统。池内循环形式造流系统的缺点是水池内的流场均匀性与稳定性难以得到保证。

假底循环形式的造流系统是依靠大功率水泵在水池一端吸取池中的水,经水泵加压后从安装在池墙另一端,均匀布置于假底下方的几排喷嘴中喷出高压水流,借以带动周围的水在水池内绕着假底循环,从而在假底上部形成一个方向的水的回流。模型试验时利用的正是假底上部的这种回流,比较均匀稳定,流速随水深的变化不大。流速的调节是由控制水泵电机的转速来实现的。挪威 MARINTEK 水池、上海交大海洋工程水池等均采用的是假底循环形式的造流系统。这种造流系统的缺点是难以模拟深水流和剖面流。

为正确模拟实际的深海水流,目前国际上先进的海洋工程水池均采用池外循环形式的造流系统,将漩涡、回流等扰动在水池外就消除掉,以保证试验区域内的流场的均匀度与湍流强度等特性满足模型试验的要求。图 2-6 为池外循环造流系统的俯视图。由图中可以看到,水流由水池外的大功率水泵驱动后,经过管路和进水廊道进入水池,再经过水池对面的出水廊道返回到管路中,形成一个完整的循环过程。通常,在深水池外的进水和出水廊道内,设置有多种整流设备,以实现高速水流进行整流后进入水池,因而具有较为均匀的流速分布,且水流的湍流强度也能满足海洋工程深水试验的要求。

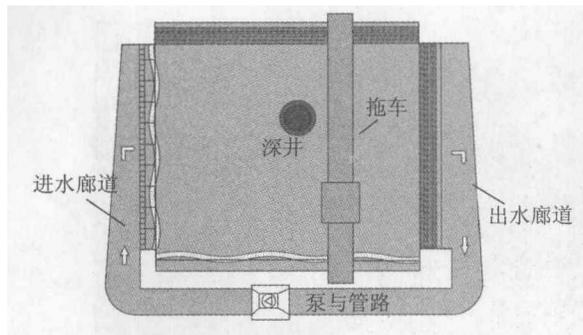


图 2-6 池外循环造流系统俯视图

目前,荷兰的 MARIN 海洋工程水池,中国上海交通大学的海洋深水试验池,均采用的是池外循环、垂向分层的深水造流系统。

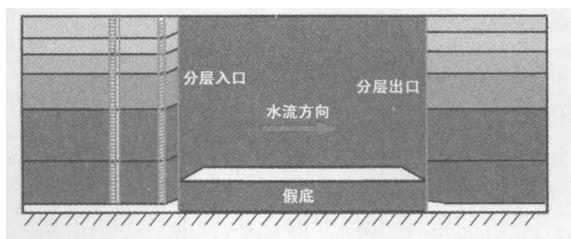


图 2-7 垂向分层的深水造流系统侧视图

#### 2.5.4 造风系统

海洋工程水池的造风系统通常由变频器、交流电机、轴流风机组、风速仪以及计算机数据采集系统和计算机控制系统等组成。目前,大多数海洋工程水池普遍采用局部造风的形式,其造风系统通常由多个轴流式风机并排组成,以保证造风的稳定区域足以覆盖海洋工程模型试验的范围。造风系统大多为可移动式,便于产生不同方向的风速。造风系统一般由计算机直接控制风机的转速,以实现模拟不同风速的定常风和非定常风。

荷兰 MARIN 海洋工程水池的造风系统如图 2-8 所示,风机固定在一个 24m 长的可旋转的构架上,可使风向与浪向成任意方向的夹角。

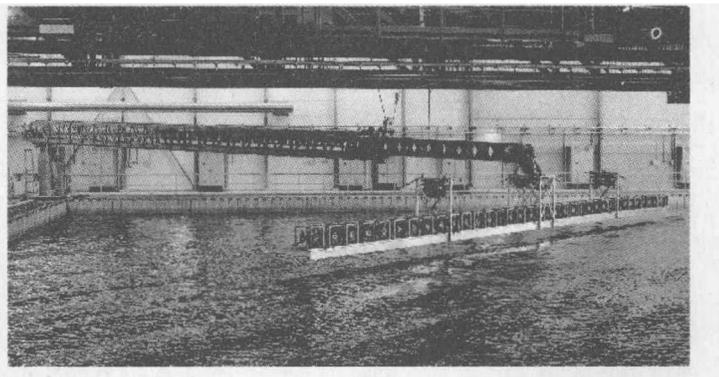


图 2-8 荷兰 MARIN 水池的造风系统

# 第 3 章 海洋工程模型试验研究的水动力学基础

本章概括介绍与海洋工程模型试验研究有关的水动力学基础知识。为了避免与流体力学和相关专业课程的重复,着重介绍概念及其理论结果在模型试验研究中的应用。

## 3.1 相似理论

流体力学中的相似理论,是指导模型试验研究以及预报实体水动力性能的基本理论。模型和实体的两个系统应该满足以下三个相似条件,即:

### 1. 几何相似

模型和实体虽然大小不同,但其形状完全相似。

### 2. 运动相似

模型和实体在流体中运动时,其对应点处在任意瞬间的同类物理量如流体的速度、加速度等都有相同的比例。

### 3. 动力相似

流体作用于模型和实体上的各种力相互成比例。这些力包括重力、惯性力、粘性力和表面张力等等。

实践证明,要完全满足所有性质的力学相似(称为完全相似)是不可能的。通常都是根据具体的试验研究对象,选择合适的相似判据(也称相似准则),以满足起支配地位的力的相似,这在相似理论中称为部分相似。

### 3.1.1 几何相似

实体和模型满足几何相似的条件是两者的所有各项相应的线性尺度之比为常数。设  $L_s$ 、 $B_s$ 、 $d_s$  及  $L_m$ 、 $B_m$ 、 $d_m$  分别代表实体和模型的长度、宽度及吃水,则:

$$\frac{L_s}{L_m} = \frac{B_s}{B_m} = \frac{d_s}{d_m} = \lambda, \quad \lambda \text{ 为缩尺比}$$

实体和模型相应的面积  $A_s$  与  $A_m$  之比为:

$$\frac{A_s}{A_m} = \lambda^2$$

实体和模型相应的体积  $\nabla_s$  与  $\nabla_m$  之比为:

$$\frac{\nabla_s}{\nabla_m} = \lambda^3$$

船舶与海洋工程结构物的模型非常复杂多样,所涉及的尺度参数成百上千。为保证模型与实体严格符合几何相似条件,就需要在模型的制作与模拟过程中,完全按照统一的模型缩尺比,对所有这些尺度参数以及外形设计尺寸等进行换算。以船舶为例,不但船舶的主要设计参

数如长度、宽度、型深、吃水、重心坐标等需要按比例换算和模拟,而且船舶的型线和型值表、上层建筑设计尺寸、总布置等也都需要严格按照比例换算和模拟。又以半潜式平台为例,其各种设计参数如下浮体长度、宽度、高度、导角半径、首尾端形状,立柱长度、宽度、高度、导角半径,主甲板长度、宽度、高度,以及下浮体、立柱和甲板相对位置参数等,都需要严格按照比例换算和模拟。

模型在海洋工程水池中试验时,其水深  $h_m$ 、波高  $H_m$  和波长  $\lambda_m$  与实体在海上的实际水深  $h_s$ 、波高  $H_s$  和波长  $\lambda_s$  也须满足几何相似条件,即:

$$\frac{h_s}{h_m} = \frac{H_s}{H_m} = \frac{\lambda_s}{\lambda_m} = \lambda$$

简而言之,凡是模型试验中涉及到线性尺度参数的,都须满足几何相似条件,实体与模型之间以线性缩尺比进行换算和模拟。

在模型试验研究中,一般只能做到模型和实体的几何相似,对于外部的边界有时候无法做到几何相似。例如,海洋平台一般是在无限宽广的海域中定位作业,但在模型试验时却要受到水池长度和宽度的限制。因此,为了避免水池池壁的影响,模型的大小常受到水池尺度的限制。

### 3.1.2 弗劳德(Froude)相似与斯特劳哈尔(Strouhal)相似准则

海洋工程模型的水动力试验主要是研究它在风、浪、流作用下的运动和受力,重力和惯性力是决定其受力的主要因素。因此,模型试验应满足弗劳德相似定律,即模型和实体的弗劳德数( $Fr$ )相等,以保证模型和实体之间重力和惯性力的正确相似关系。此外,物体在波浪上的运动和受力带有周期变化的性质,模型和实体还必须保持斯特劳哈尔数( $Sr$ )相等。因此,

$$\frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}}$$

$$\frac{V_m T_m}{L_m} = \frac{V_s T_s}{L_s}$$

式中: $V$ 、 $L$ 、 $T$  分别为特征速度、特征线尺度和周期(或时间);下标  $m$  及  $s$  分别表示模型和实体。

模型试验通常都是在水池的淡水中进行,而实体则在海水中作业,因此对海洋工程模型试验的结果需要进行水的密度修正。设海水与淡水密度之比为  $\gamma$ ,一般取  $\gamma=1.025$ 。

考虑到上述相似准则,以及水密度的修正,模型与实体各种物理量之间的转换关系如表 3-1 所示。

表 3-1 模型与实体各种物理量之间的转换关系

项目	符号	转换系数	项目	符号	转换系数
线尺度	$\frac{L_s}{L_m}$	$\lambda$	周期	$\frac{T_s}{T_m}$	$\lambda^{1/2}$
面积	$\frac{A_s}{A_m}$	$\lambda^2$	频率	$\frac{f_s}{f_m}$	$\lambda^{-1/2}$
体积	$\frac{\nabla_s}{\nabla_m}$	$\lambda^3$	水的密度	$\rho_s/\rho_m$	$\gamma$

(续表)

项目	符号	转换系数	项目	符号	转换系数
线速度	$\frac{V_s}{V_m}$	$\lambda^{1/2}$	质量(排水量)	$\frac{\Delta_s}{\Delta_m}$	$\gamma\lambda^3$
线加速度	$\frac{a_s}{a_m}$	1	力	$\frac{F_s}{F_m}$	$\gamma\lambda^3$
角度	$\frac{\phi_s}{\phi_m}$	1	力矩	$\frac{M_s}{M_m}$	$\gamma\lambda^4$
角速度	$\frac{\dot{\phi}_s}{\dot{\phi}_m}$	$\lambda^{-1/2}$	惯性矩	$\frac{I_s}{I_m}$	$\gamma\lambda^5$

注:其他物理量之间的转换关系,可以用质量、长度及时间的基本因次求得。

除表 3-1 所列的各种物理量之外,模型试验中还会应用到其他一些物理量,如刚度、单位长度重量、弹性系数、恢复力系数、阻尼系数、风力系数、流力系数、功率谱密度等,其转换系数都可以应用质量、长度及时间等基本变量的转换关系计算得到。

水流流经直立的圆柱体时(如单柱式平台的圆柱外壳、锚链、立管等),其后部会周期性地产生旋涡,因而引起物体受到周期性的作用力,形成物体的振动,通常称为涡激振动(VIV)。对于涡激振动的试验研究必须满足模型和实物的斯特劳哈尔数相等。

### 3.1.3 关于粘性相似问题

弗劳德相似保证了模型与实体之间的重力和惯性力的正确关系,但在模型水动力试验的某些方面,要求正确模拟粘性力的相似。例如船舶和 FPSO 的粘性横摇阻尼力矩和低频慢漂阻尼力、立管与系泊缆等所遭受的粘性作用力等等。雷诺相似准则可以保证模型和实体之间的粘性力与惯性力的正确关系,这就要求模型和实体的雷诺数( $Re = \frac{VL}{\nu}$ )相等,其中  $\nu$  为水的运动粘度。

众所周知,在船舶和海洋工程领域的水动力试验中,不可能做到模型和实体两者的雷诺数相等。一般情况下,模型的雷诺数较实物的雷诺数要小两个量级( $10^2$ )。因此,模型试验中所产生的粘性力系数、浮体的粘性横摇阻尼和低频慢漂阻尼、系泊缆的粘性阻尼等都大于实体所对应的值。也就是说,模型所经受的极值运动和受力按比例都将小于实体的情况,用模型试验的结果直接预报实体的情况将偏小,给实际应用带来一定的风险。

有关雷诺相似准则的研究已有近百年的历史,而且还在继续研究,目前都是针对具体情况采取适当措施弥补。例如在模型表面增加粗糙度或激流装置以保持模型层流中的流动状态与实体一致,有些试验则调节模型构件的直径而作为阻力系数误差的修正。有些则进行不同缩尺比几何相似构件的系列试验,然后用于计算分析时作为误差的修正。现时对雷诺相似的问题还没有一个简单明确的答案。对于海洋平台而言,在许多情况下,最好的办法通常是具体分析尺度作用并进行适当修正,借以保证不致由此而影响到实际系统的安全。

## 3.2 海洋环境条件的理论描述

海洋环境条件主要是指风、浪、流及水深,海上的风、浪、流等实际情况相当复杂。因此在

海洋工程水动力性能的研究中,需要对复杂的海洋环境进行合乎实际的简化处理并作相应的理论描述。

### 3.2.1 规则波

在第1章中,已经简要提到海面上有比较规则的长波峰的涌浪,但多数是不规则的风浪。由于规则波是研究不规则波的基础,先对规则波的主要参数及其性质简述如下。

前进中的长波峰规则波的表面波形,在理论上可视为二因次的余弦或正弦曲线(二者形状相同,仅相位差  $\pi/2$ )。设波幅为  $A$  的余弦波沿  $x$  方向传播,则其波面方程式可表示为:

$$\zeta(x,t) = A\cos(kx - \omega t) \quad (3-1)$$

图3-1所示为余弦波的波形曲线,其中图(a)表示某一固定时间(设  $t=0$ )波形沿  $x$  方向的情况,图(b)为某一固定地点(设  $x=0$ )波形通过该点随时间的变化情况。从图中可以清楚地看到,有关波浪的各要素为:

(1) 波幅  $A$ —波形离静水面最大抬高(称为波峰)或最大下陷(称为波谷)的距离。

(2) 波高  $H$ —波峰与波谷之间的垂向距离,且  $H=2A$ 。

(3) 波长  $\lambda$ —相邻两个波峰或波谷之间的水平距离,从式(3-1)或图3-1(a)中可以看出,  $k\lambda=2\pi$  或波长  $\lambda=\frac{2\pi}{k}$ ,因此  $k$  的物理意义为在  $2\pi$  距离内波的数目,称为波数。

(4) 波浪周期  $T$ —波形每前进一个波长所需的时间,或两相邻的波峰或波谷经过同一固定点的时间间隔。从式(3-1)或图3-1(b)中可以看出,  $\omega T=2\pi$ ,或周期  $T=\frac{2\pi}{\omega}$ , $\omega$  的物理意义为波浪的圆频率。

(5) 波速  $c$ —波形向前推进(或传播)的速度,波形前进一个波长  $\lambda$  所需的时间为  $T$ ,故  $c=\frac{\lambda}{T}$ 。

(6) 水质点轨圆运动半径  $r$ —从实际观察和波浪理论可知,波形向前传播时,水质点并不随波形一起前进,而是就地以半径  $r=Ae^{kz}$  作轨圆运动。在自由表面上  $z=0$ ,水质点运动的轨圆半径即为波幅  $A$ ,在自由表面以下的波动面称为次波面。在水面以下  $h$  处的轨圆半径  $r_h =$

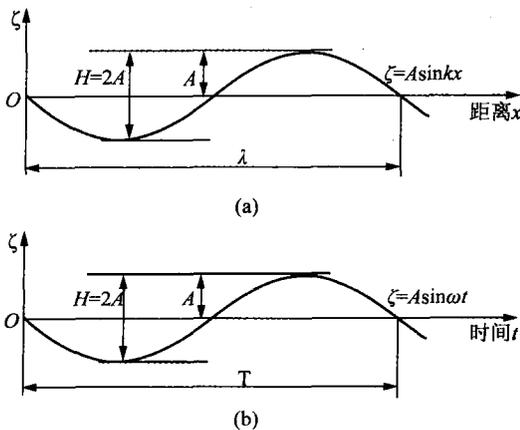


图 3-1 余弦波的波形曲线

$Ae^{-kh}$ ,其轨圆半径  $r_h$  随深度  $h$  的增加而迅速衰减。在工程实用上,当水深为波长一半(即  $h=\frac{\lambda}{2}$ )时,轨圆半径  $r_h = Ae^{-k\lambda/2} = Ae^{-\pi}$  可忽略不计,即可认为是深水波。

根据波浪理论可知,规则波的波速  $c$  与圆频率  $\omega$  的关系为:  $c=g/\omega$ 。

综合上述各关系式,可以得出波长  $\lambda$ 、波速  $c$ 、周期  $T$  之间比较直观实用的关系式:

$$\left. \begin{aligned} c &= \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \approx 1.25\sqrt{\lambda} \\ T &= \frac{2\pi}{\omega} = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \approx 0.8\sqrt{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (3-2)$$

由此可见,波长越大,传播的速度越快,周期越长。

另外,根据波长  $\lambda$  与波数  $k$  的关系,波速  $c$  可表示为:

$$\begin{aligned} c &= \omega/k = \sqrt{g/k} \\ \text{或 } k &= \omega^2/g = g/c^2 \end{aligned} \quad (3-3)$$

式(3-3)称为“色散”关系式,表示不同波数或波频的二因次前进波在水中传播时,存在传播速度不同的“色散”现象。

当水面至海底的水深  $h$  小于波长  $\lambda$  的一半时,波浪运动受到海底的影响,成为浅水波,水质点的轨圆运动变为椭圆运动。根据有限水深线性波理论,波速  $c$  与波长  $\lambda$  及波数  $k$  的关系式为:

$$\left. \begin{aligned} c &= \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \sqrt{\tanh \frac{2\pi h}{\lambda}} \\ c &= \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \end{aligned} \right\} \quad (3-4)$$

由此可见,有限水深时波的传播速度  $c$  不仅与波长  $\lambda$  有关,还与水深  $h$  有关。

根据正切双曲函数  $\tanh \frac{2\pi h}{\lambda}$  的性质可知,当  $h > \frac{\lambda}{2}$  时,  $\tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \rightarrow 1.0$ , 式(3-4)表示的波速变为  $c \approx \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$ , 成为深水波的波速。当水深  $h$  极浅时 ( $h < \frac{\lambda}{20}$ ),  $\tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \rightarrow \frac{2\pi h}{\lambda}$ , 式(3-4)表示的波速变为  $c \approx \sqrt{gh}$ , 表明在极浅水区域波浪的传播速度与波长  $\lambda$  无关,而只与水深  $h$  有关。

设有两组同方向前进的长峰规则波,则其混合的波面方程为

$$\zeta(x, t) = A \cos(k_1 x - \omega_1 t) + A \cos(k_2 x - \omega_2 t) \quad (3-5)$$

如果两者频率(或周期)十分接近,设  $\omega_1 < \omega_2$ , 则前一组波浪的周期  $T_1$  较后一组波浪的周期  $T_2$  略大,波速也略快。于是两组规则波混合的波面成为图 3-2 所示的长波峰前进波群。

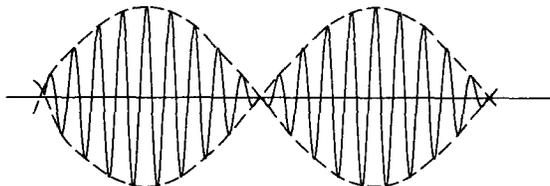


图 3-2 波群示意图

波群中最大波幅为  $2A$ , 表示两组波浪的波峰相重合。最小波幅为 0, 表示一组波浪的波峰恰与另一组波浪的波谷相重合。波浪在前进时,波群亦向前推进。如果用包络线连接波群中的各波浪的“峰”“谷”,则包络线向前移动的速度称为波群速  $c_g$ , 而包络线中各波浪的前进速度为  $c$ 。根据规则波的线性理论,波群速  $c_g$  与波速  $c$  的关系为:

(1) 深水波 ( $h \geq \frac{\lambda}{2}$ )

$$c_g = \frac{1}{2} c \quad (3-6)$$

(2) 浅水波 ( $\frac{\lambda}{20} < h < \frac{\lambda}{2}$ )

$$c_g = \frac{1}{2} c \left[ 1 + \frac{4\pi h/\lambda}{\sinh(4\pi h/\lambda)} \right] \quad (3-7)$$

(3) 极浅水波 ( $h \leq \frac{\lambda}{20}$ )

$$c_g = c = \sqrt{gh} \quad (3-8)$$

上面简略介绍的是波群和波群速的基本物理概念。根据波浪的理论分析,前进规则波的波能是以波群速传播的,即波能的传播速度等于波群速。

## 3.2.2 不规则波

海面上的风浪时大时小,参差不齐地围绕着平均水面上下起伏,成为不规则的波浪。图 3-3(a)是实测的不规则海浪的时间历程曲线,纵坐标代表波面高度  $\zeta(t)$ ,波面高度跨过平均水面(称为零点)正负变化。每两个相邻上下跨零点之间的峰谷距离即为波高,每一个波的波高、波长和周期都是随机变化的,因此不能像规则波那样用固定的表达式来描述海上的不规则波。根据波浪的线性叠加原理,认为不规则波是由无数不同波长、不同波幅和随机相位的单元规则波叠加而成的,如图 3-3(b)所示。因而不规则波的波面可以表示为:

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \quad (3-9)$$

式中:  $a_n$ 、 $\omega_n$  和  $\varepsilon_n$  分别为第  $n$  个余弦波的波幅、圆频率和随机相位;  $\varepsilon_n$  是在  $0 \sim 2\pi$  之间均匀分布的随机量。

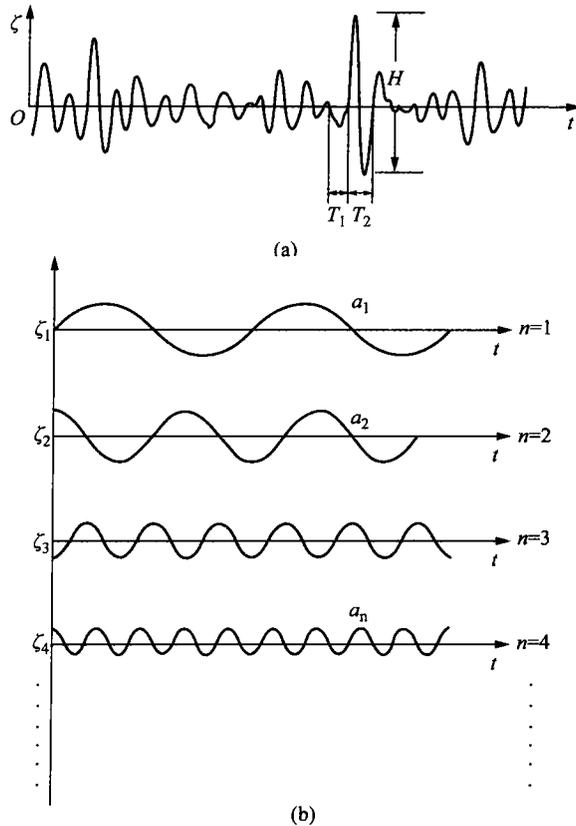


图 3-3 不规则波

(a) 海上定点实测的不规则波波面; (b) 众多规则波叠加组成不规则波的示意图

线性叠加原理是处理不规则波的基本思想。如果组成不规则波的各单元波都是同一方向前进,则不规则波必然也是同一方向传播,这便是通常所称的二因次不规则波或长波峰不规则波。在自然界中虽然没有真正的长波峰不规则波,但通常的海浪存在主要的传播方向,用长波峰不规则波的概念来处理海上的实际风浪,能够得到工程上相当满意的结果。当不规则波浪由不同传播方向的单元波叠加而成时,便成为三因次不规则波或称为短波峰不规则波。

大量的海上实测资料表明,海面波动可以看作是平稳的,各态历经的,具有高斯正态分布特征的随机过程,因而船舶和海洋工程界通常都是以各态历经的平稳随机过程作为海上风浪以及船舶与海洋工程结构物的运动与受力等统计分析的基础。这样可使随机过程的统计特性分析计算大为简化。例如对某一海区风浪的特性分析,只要在该海区某一定点用一个浪高仪,以足够长的时间纪录波浪数据,对其进行分析所得的统计特性就能表征整个海区的统计特性。

在船舶及海洋工程界,广泛应用不规则波的谱密度分析方法。这是由于谱密度表示了不规则波内各单元谐波的能量分布情况,显示出不规则波的组成中哪些频率的单元波起主要作用,哪些频率的单元波起次要作用,因而清楚地说明了不规则波的特性和内部结构。图3-4为波浪谱的示意图,纵坐标  $S(\omega)$  为谱密度(单位是  $\text{m}^2\text{s}/\text{rad}$ ),横坐标  $\omega$  为圆频率(单位是  $\text{rad}/\text{s}$ )。图中: $S(\omega_n)$ 代表频率为  $\omega_n$ 、间隔为  $\Delta\omega$  内相应组成波浪的平均能量; $\omega_p$  为谱峰频率, $T_p = \frac{2\pi}{\omega_p}$  为谱峰周期, $S(\omega_p)$  是对应的谱峰值,代表最大的波浪平均能量。

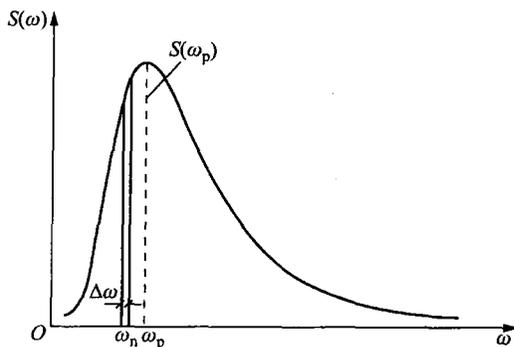


图3-4 海浪谱

谱密度曲线下的面积是单位波面内波浪总能量的量度,是衡量海况严重程度的主要指标,与均方差  $\sigma$  的关系如下式:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (3-10)$$

不规则波的重要统计特征之一是波高,其中工程界通常所关心的包括十一波高  $H_{1/10}$ 、三一波高  $H_{1/3}$  和平均波高  $\bar{H}$ 。由于目测海浪的波高与  $H_{1/3}$  相当接近,因而  $H_{1/3}$  被认为是有代表性和有意义的,通常又称为有义波高或三一有义波高,以  $H_s$  表示。 $H_{1/3}$  的物理意义是把所有测得不规则波的波高按大小依次排列,将最大的  $1/3$  个波高平均所得之值。同理, $H_{1/10}$  为最大的  $1/10$  个波高平均所得之值, $\bar{H}$  为所有波高的平均值。谱分析的相关理论证明, $H_{1/3}$  与  $\sigma$  的关系近似为: $H_{1/3} = 4\sigma$ 。

波谱密度的公式可从海上大量的实测数据分析得到,也可根据理论和经验关系导出。现时发表的各种海浪谱的表达式众多,这里介绍几种常用的长波峰不规则波的波谱公式以资参考。

#### 1) P-M 谱

这是皮尔逊和莫斯科维奇根据北大西洋测得的大量数据而提出的公式:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (3-11)$$

式中:  $A=0.0081g^2$ ;  $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ );  $B=0.74(g/U)^2$ ;  $U$  为海面上 19.5m 高度处的风速 ( $m/s$ )。

目前采用的大多数标准波谱主要是根据 P-M 谱的形式而建立的。

## 2) ITTC 单参数波谱

鉴于海浪的严重程度直接与波高有关,用有义波高来描述波谱更为合适,ITTC 将 P-M 波谱中的  $B$  以有义波高  $H_{1/3}$  来替代风速  $U$ ,并得出  $B=\frac{3.11}{H_{1/3}^2}$ ,同时  $A=0.0081g^2=0.78$ ,于是 P-M 谱便成为:

$$S(\omega) = \frac{0.78}{\omega^5} \exp\left(-\frac{3.11}{H_{1/3}^2 \omega^4}\right) \quad (3-12)$$

上式便是 1966 年 ITTC 建议的单参数波谱,简称 ITTC 单参数波谱。

P-M 谱和 ITTC 单参数波谱的谱峰频率  $\omega_p$  为:  $\omega_p = (0.74B)^{\frac{1}{4}}$ 。

## 3) ITTC (ISSC) 双参数波谱

第十二届(1969 年)ITTC 建议采用的双参数波谱的形式为:

$$S(\omega) = \frac{173H_{1/3}^2}{T_1^4} \omega^{-5} \exp\left(-\frac{691}{T_1^4} \omega^{-4}\right) \quad (3-13)$$

式中:  $T_1$  为特征周期。根据实测资料,ITTC 建议  $T_1$  近似地可取为目测所得的平均周期。上式与第二届国际船舶结构会议 (ISSC) 确定的标准波谱的形式是一致的。

对应的谱峰频率  $\omega_p = \frac{4.85}{T_1}$ 。

## 4) JONSWAP 谱

这是 1973 年由欧美等国家对“北海海浪联合计划”测量海浪分析整理得出的波谱,目前应用最为普遍,公式为:

$$S(f) = \alpha H_s^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2]} \quad (3-14)$$

式中:  $f$  为波浪频率 (Hz);  $\gamma$  为形状参数;

$$\sigma = 0.09 \quad \text{对于} \quad f \geq f_p$$

$$= 0.07 \quad \text{对于} \quad f < f_p$$

$$\alpha = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185/(1.9 + \gamma)}$$

第十五届 ITTC(1978)建议采用 JONSWAP 的平均波谱 ( $\gamma=3.3$ ) 作为有限风区的波谱,当  $\gamma=1.0$  时, JONSWAP 谱又被称为双参数 P-M 谱。

在波谱的表达式中,除谱峰周期  $T_p$  外,有时还考虑其他的周期定义,常用的有:

(1) 有效波周期  $T_s$  表示不规则波中波高最大的 1/3 个波浪的周期平均值。

(2) 最大波高周期  $T_{\max}$  表示不规则波中最大波高的周期值。

(3) 特征周期  $T_1$  也称为谱形心周期。

(4) 过零周期  $T_2$  或  $T_z$ , 表示不规则波中波面通过零点的平均周期。

上述各种周期之间的关系一般由实测资料的统计分析确定。对于无限风区的实测海浪,统计关系为:

$$T_s/T_p \approx 0.93, T_1/T_p \approx 0.78, T_2/T_p \approx 0.76, T_{\max}/T_s \approx 1.0$$

## 5) 方向波谱

自然界的海浪往往不是沿一个固定的方向传播,它有一个主要的传播方向及其他不同方向传来的波浪。代表多方向组成的不规则波结构的波谱称为方向波谱或短波峰不规则波波谱或三因次波谱。由于观测手段、资料采集和分析处理等方面的困难,至今可供工程界应用的方向波谱不多。

方向谱的表达式通常表示为:

$$S(\omega, \theta) = S(\omega)D(\omega, \theta) \quad (3-15)$$

式中:  $S(\omega)$  为主要传播方向长峰波不规则波的波谱;  $\theta$  为组成波与主浪向的夹角;  $D(\omega, \theta)$  为方向扩展函数或方向分布函数,工程界常用的一般形式为:

$$D(\omega, \theta) = k_n \cos^n \theta, \text{ 且 } |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \quad (3-16)$$

国际船模试验池会议(ITTC)建议取  $n=2, k_n=k_2=\frac{\pi}{2}$ 。

国际船舶结构会议(ISSC)则建议取  $n=4, k_n=k_4=\frac{8}{3\pi}$ 。

### 3.2.3 海流

海流是大范围的海水以某一速度在水平或垂直方向连续的流动,是海洋环境中重要的自然现象。在设计建造海洋工程结构物的水下部分时,必须考虑海流所引起的载荷,对于海洋平台在拖航时的拖曳力以及定位以后的缆绳系泊力等也须考虑海流的作用。

在海洋工程水动力性能的研究中,通常不考虑水流随时间的变化以及水流的垂向运动,亦即只考虑水流在水平方向的二因次流动。至于水流速度随深度的变化视具体情况而定。例如:在外海区域主要是风引起的风海流,具有表层流的性质,常假定水流不随深度变化而取某一平均水流速度,如图 3-5(a)所示。对于浅水海域,水流速度受底部的摩擦等影响而减小,形成梯度流(或称分层流),通常以直线规律或某一简单的曲线来表示,如图 3-5(b)和图 3-5(c)所示。在近岸浅水区域由于波浪破碎等原因引起的水流,往往存在回流现象,水流沿深度的变化如图 3-5(d)所示。

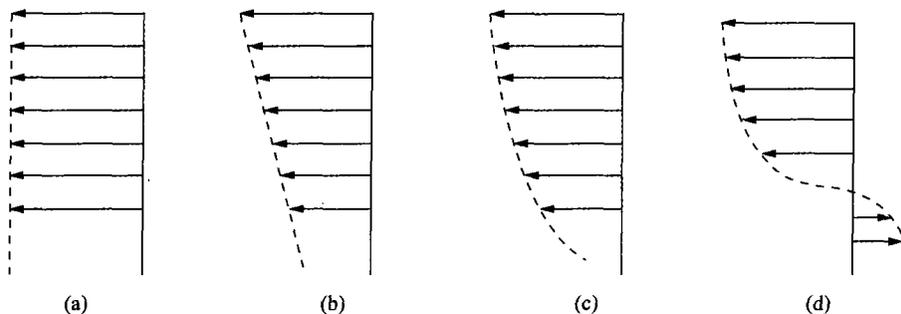


图 3-5 水平方向平均流速随水深的变化

### 3.2.4 风

风是大范围的空气以某一速度在水平或垂直方向连续的流动,是海洋环境中重要的自然现象。在设计建造海洋工程结构物的水上部分时,必须考虑风所引起的载荷。

在海洋工程结构物水上部分风载荷的计算中,常不考虑风速随时间的变化以及空气的垂向运动,亦即只考虑空气在水平方向的等速二因次流动,并称之为定常风。由于地球表面(海面)对空气的流动有摩擦作用,风速的大小随高度而变化,国际上通常以海面上高度为 10m 处的风速作为标准数值,记作  $V_{10}$ 。国际船舶结构会议(ISSC)给出了风速随高度变化的计算公式如下:

$$\frac{V_z}{V_{10}} = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (3-17)$$

式中: $V_z$  为海面以上  $z$  m 高度处的风速; $\alpha$  为指数系数,可取 0.09 或 0.10。

根据海域统计资料给出的  $V_{10}$ ,可以简便地求得风速随高度的变化,进而计算在定常风情况下海洋平台上层建筑的风载荷。

实际上,自然界的风速总是在平均风速数值上下呈脉动变化,脉动的强弱与脉动频率也是一种随机现象,表明风速也有频谱的特性。有些海洋平台在设计中常考虑不规则风(即非定常风)的作用。海洋工程界常用下列两种风谱来描述不规则风场的特性。

#### 1) API 风谱

这是美国石油研究所(API)给出的风谱,公式为:

$$S(f) = \frac{\sigma^2(z)}{f} \cdot \frac{F}{(1+1.5F)^{5/3}} \quad (3-18)$$

式中: $F=f/f_p$ ,  $f_p=0.025V(z)/z$ ;  $\sigma(z)=0.15V(z)(z/z_s)^{-0.125}$ ;  $V(z)$  为静水面以上高度为  $z$  m 处 1h 的平均风速(m/s);  $z_s=20$  m,称为表面层厚度。

#### 2) NPD 风谱

这是挪威石油理事会(NPD)于 1992 年给出的风谱,公式为:

$$S(f) = \frac{320\left(\frac{V_0}{10}\right)^2 \left(\frac{z}{10}\right)^{0.45}}{(1+1.5F)^{5/3n}} \quad (3-19)$$

式中: $F=172f\left(\frac{V_0}{10}\right)^{-3/4} \left(\frac{z}{10}\right)^{2/3}$ ;  $n=0.468$ ;  $V_0(z)$  为静水面以上高度为  $z$  m 处 1h 的平均风速(m/s);  $z$  为海面以上的高度,一般取 10m。

关于海洋环境中的水深问题,在海洋平台水动力性能的研究中,通常把海洋平台工作水深处的海洋底部作为平面处理,即不考虑海洋底部地质、地貌等复杂情况。

### 3.3 浮体运动的坐标系和六自由度运动

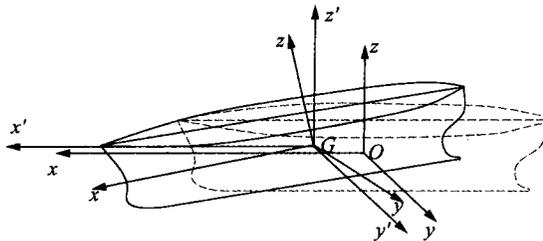


图 3-6 描述浮体运动的三个坐标系

船舶或浮式海洋平台在海上作业时遭受风、浪、流的作用,会产生相当复杂的运动。在水动力学研究中,除水弹性力学以外,通常都把船舶或浮式海洋平台看作是刚体,并用如图 3-6 所示的三个坐标系将复杂的运动分解为六个自由度的运动。

图中三个坐标系的定义如下:

(1) 固定坐标系  $O-xyz$  是固定在地球

上的直角坐标系,又称大地坐标系(Earth-fixed Coordinate System), $xy$ 平面与静水面重合。

(2) 平移坐标系  $G-x'y'z'$  一般以船舶重心  $G$  为原点,相对于固定坐标系作平移运动的坐标系,又称半固定坐标系。三个坐标轴始终与固定坐标系的坐标轴相平行。

(3) 运动坐标系  $G-xyz$  一般以船舶重心  $G$  为原点,固定于船体上的直角坐标系,又称随船坐标系(Vessel-fixed Coordinate System),是始终固定在船舶或海洋平台上一同运动的坐标系。

在船舶或海洋平台运动的初始时刻,运动坐标系  $G-xyz$  与固定坐标系  $O-xyz$  相重合。在任意时刻,运动可以分解为沿  $O-xyz$  坐标系三个坐标轴的直线运动以及绕  $G-xyz$  坐标系三个坐标轴的转动。在这些运动中又有单向运动和往复运动之分,因此共有 12 种运动形式,如图 3-7 所示。

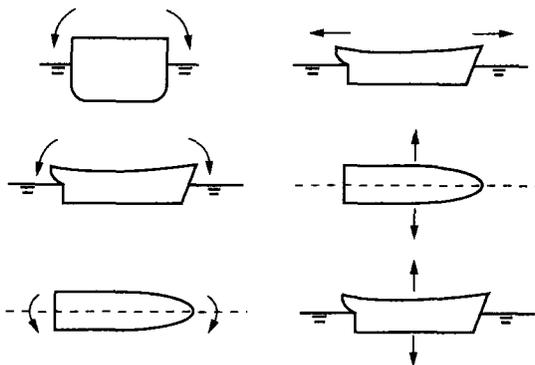


图 3-7 浮体六自由度运动的定义

对于浮体的六自由度运动,船舶与海洋工程界习惯上采用的名称是:

#### 1) 直线运动

(1) 沿  $Ox$  轴的单向运动称为前进或后退,往复运动称为纵荡(Surge)。

(2) 沿  $Oy$  轴的单向运动称为横漂,往复运动称为横荡(Sway)。

(3) 沿  $Oz$  轴的单向运动称为上浮或下沉,往复运动称为垂荡(Heave)。

上述三个自由度的直线运动是以固定坐标系  $O-xyz$  为基准,因而随参考点(如重心  $G$ )位置的变化而变化。实用上常以重心  $G$  的位置变化情况来描述直线运动。

#### 2) 绕坐标轴的转动

(1) 绕  $Gx$  轴的单向转动称为横倾,往复运动称为横摇(Roll)。

(2) 绕  $Gy$  轴的单向转动称为纵倾,往复运动称为纵摇(Pitch)。

(3) 绕  $Gz$  轴的单向运动称为转向(或回转),往复运动称为首摇(Yaw)。

上述三个自由度的转动是以随船坐标系  $G-xyz$  为基准,不随参考点位置的变化而变化。

在六个自由度的运动中,可分为两类不同特征的运动。一类是垂荡、横摇和纵摇运动(统称为垂直面运动),由于流体的静力作用,具有复原力或力矩,有稳定的静平衡位置,在外力作用下虽偏离原平衡位置,但当外力消除后能自动回复到原来的平衡位置。另一类是纵荡、横荡和首摇运动(统称为水平面运动),自身没有复原的能力,在外力作用下偏离原来的平衡位置后,即使外力消失也不会回复到原来的平衡位置,因此对于浮式海洋平台,必须借助系泊系统或动力定位提供的回复力来保持其平衡位置。

为了清楚地描述六个自由度的运动,在右手坐标系中,一般规定  $x$  轴指向船首为正,  $y$  轴指向左舷为正,  $z$  轴垂直向上为正。对于运动方向正负的规定为:纵荡沿船首方向为正,横荡沿左舷方向为正,垂荡向上为正(即三个直线运动的正负方向与坐标轴一致),横摇向右舷倾侧为正,纵摇向船首倾侧为正,首摇以船首向左舷偏侧为正,如图 3-8 所示。

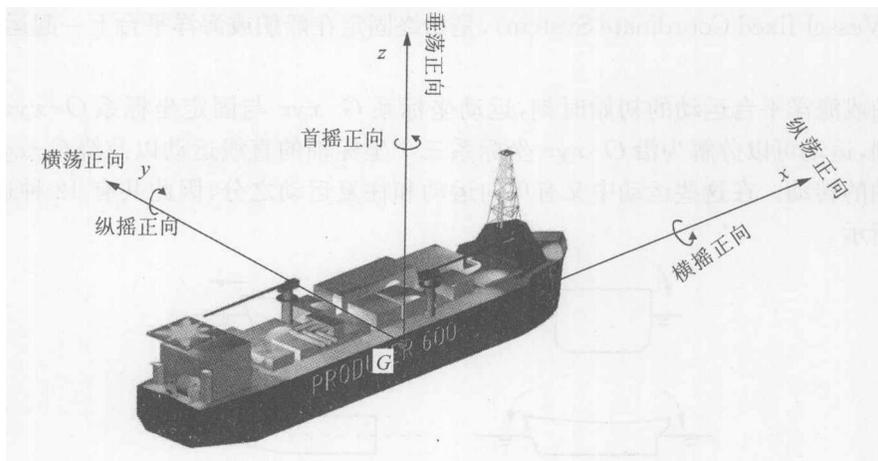


图 3-8 浮体坐标系及运动正负方向的定义

顺便指出,坐标系的原点(即运动参考点)并非一定要选在重心  $G$  处,可以根据研究问题的需要任意选择,但是三个坐标系的定义以及坐标轴的方向一般应保持不变。

### 3.4 浮体所受的海洋环境载荷、流体作用力与系泊力

浮式海洋平台在海上定位作业时产生六自由度运动,必然受到各种外力的作用。对于海洋工程水动力学研究而言,一般应考虑的外力作用包括:风、浪、流等海洋环境所产生海洋环境载荷,周围海水的流体反作用力,定位系统所产生的系泊力。

设浮式海洋平台在海上受到总的外力为  $F$ ,则可将  $F$  分解为:

$$F = F_W + F_C + F_{WD} + F_S + F_R + F_M \quad (3-20)$$

式中:  $F_W$  为波浪扰动力,简称波浪力;

$F_C$  为海流的作用力,简称流力;

$F_{WD}$  为风的作用力,简称风力;

$F_S$  为流体静力,或称水静力、静恢复力;

$F_R$  为由于平台运动引起的流体反作用力,或称流体动力;

$F_M$  为定位系统的作用力,简称系泊力。

其中,  $F_W$ 、 $F_C$  和  $F_{WD}$  一般统称为海洋环境载荷,  $F_S$  和  $F_R$  统称为流体作用力。对上述各项外力分别简要说明如下。

#### 3.4.1 波浪扰动力(Wave Exciting Force,简称波浪力)

波浪扰动力相当于浮体固定不动,波浪经过浮体时作用在浮体上的外力。它由波浪引起浮体湿表面上的压力变化以及浮体对波浪的绕射和反射所决定。根据小参数摄动理论,浮体

在波浪中所受的波浪扰动力通常可分解为一阶波浪力  $F_w^{(1)}$  和二阶波浪力  $F_w^{(2)}$ 。

一阶波浪力是浮体在波浪中最直接感受到的波浪作用力,变化的幅值相对较大,与波浪具有相同的频率。对于浮式海洋平台而言,其结构特征尺度与波长比一般较大,属于所谓的“大型结构物”或“大尺度结构物”范畴,必须考虑物体存在对波浪场的影响。基于线性势流理论的假定,一阶波浪力的大小与波幅成正比,其比例关系定义为波浪力的幅值响应函数(RAO)。

在线性波浪理论(一阶波理论)中,我们已知深水波的水质点作封闭的轨圆运动,有限水深波的水质点作封闭的椭圆运动,总之水质点仅在原地运动并不随波浪前进。实际波浪中的水质点基本上是轨圆运动但并不完全封闭,水质点会沿波浪前进方向十分缓慢的移动。因此,浮式结构物在波浪的作用下会沿着波浪传播方向产生缓慢的漂移,波浪的作用时间越长,漂移的距离越大。

使浮式结构物在波浪中产生漂移的作用力称为波浪漂移力(Wave Drift Force),是非线性的二阶波浪力,其成分包括:

(1) 平均(Mean)波浪漂移力,或称定常(Steady)波浪漂移力、平均波浪力。与波浪传播方向一致,使无航速的船舶和浮式海洋平台等浮式结构物产生平均漂移,使航行中的船舶产生阻力增加。

(2) 缓变(Slow Varying,或称低频,Low Frequency)的波浪漂移力,或简称为波浪慢漂力。这是波浪作用在浮式结构物上随时间呈缓慢周期性变化的力,虽然量级不大,但是由于系泊船舶或浮式海洋平台水平面运动的自然频率通常很低,波浪慢漂力的频率与之相接近,所以容易导致产生长周期、大幅度的低频共振水平面运动,在系泊系统中引起相当大的受力响应,极大地影响系泊系统的安全。

(3) 高频(或称和频、倍频,Sum Frequency)波浪力。这是波浪作用在浮式结构物上随时间呈高频率(高于波浪频率)周期性变化的力,会使浮式结构物产生高频弹振(Springing),引起结构的疲劳破坏。特别是对于固有频率相对较高的张力腿平台,和频率可以激发垂荡、首摇和横摇运动的共振响应,导致张紧拉索的疲劳损伤。

对于规则波而言,二阶波浪力包括平均波浪漂移力和频率为规则波二倍的倍频波浪力。对于不规则波而言,则除了包含平均波浪漂移力、倍频波浪力外,还包括各成分波的频率之差所产生的低频波浪力(即波浪慢漂力),以及各成分波频率之和的高频(和频)波浪力。

二阶波浪力相比于一阶波浪力,大小通常相差一到二个量级,是小量。但对于船舶和浮式海洋工程结构物而言,二阶波浪力是非常重要的,特别是平均波浪力和波浪慢漂力,对于系泊系统和推进器系统的设计、拖航系统设计和拖航阻力估算、船舶在波浪中阻力增加的计算、潜艇在近水面时的性能分析,以及大体积小水线面浮体缓慢垂荡、首摇和横摇运动的分析,都是主要考虑的外力因素。

平均波浪力和波浪慢漂力的大小,与入射波波幅的平方成正比,其比例关系定义为二阶波浪力的二次传递函数(Quadratic Transfer Function,简称 QTF)。

### 3.4.2 风的作用力

海洋平台的上部模块兼具生活和油气生产等多种功能,设施非常复杂、庞大,受风面积也较大,因此由风引起的动态载荷往往成为海洋环境载荷中的主要成分,对浮式海洋平台的运动性能和结构响应有着重要的影响。确定风载荷最好的方法是在风洞中进行模型试验,其结果

精度高,最为可靠。如果没有风洞试验资料,对风载荷的计算则一般采用经验公式和经验数据进行。

风作用在船舶或海洋平台水上部分的力通常包括三个分量,即纵向力  $F_{WDx}$ 、横向力  $F_{WDy}$  和绕垂向轴的首摇力矩  $F_{WDM}$ ,计算公式可表示为:

$$\left. \begin{aligned} F_{WDx} &= \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_{Wx}(\alpha_w) A_L \\ F_{WDy} &= \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_{Wy}(\alpha_w) A_T \\ F_{WDM} &= \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 C_{WM}(\alpha_w) A_T L \end{aligned} \right\} \quad (3-21)$$

式中:  $\rho_a$  为空气密度;  $V_w$  为海平面上方 10m 处平均风速;  $C_{Wx}$ 、 $C_{Wy}$  和  $C_{WM}$  分别为与风向角有关的纵向风力、横向风力和首摇风力矩系数;  $\alpha_w$  为风向与船舶或海洋平台首向角之间的夹角,简称风向角;  $A_L$ 、 $A_T$  分别为纵向和横向的受风面积;  $L$  为特征长度。

风力系数和流力系数有许多相似之处,可从相关的参考资料查得。有些国家的船舶及海洋平台检验机构,对于风力和流力的计算有相应的规定,可供参考使用。

### 3.4.3 流的作用力

水流速度变化相对来说比较缓慢,在计算中常将水流看作是稳定的流动。流作用在船舶或海洋平台水下部分的力通常也包括三个分量,即纵向力  $F_{Cx}$ 、横向力  $F_{Cy}$  和绕垂向轴的首摇力矩  $F_{CM}$ 。对类似于船舶形状的对象而言,流力的计算公式可表示为:

$$\left. \begin{aligned} F_{Cx} &= \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 C_{Cx}(\alpha_c) TB \\ F_{Cy} &= \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 C_{Cy}(\alpha_c) TL \\ F_{CM} &= \frac{1}{2} \rho_w V_c^2 C_{CM}(\alpha_c) TL^2 \end{aligned} \right\} \quad (3-22)$$

式中:  $V_c$  为水流速度;  $\rho_w$  为海水密度;  $C_{Cx}$ 、 $C_{Cy}$  和  $C_{CM}$  分别为与流向角有关的纵向流力、横向流力和首摇流力矩系数;  $\alpha_c$  为水流方向与船舶或海洋平台首向角之间的夹角,简称流向角;  $T$ 、 $B$ 、 $L$  分别为船舶或平台的吃水、宽度及长度。

流力系数通常采用经验公式进行估算,也可用模型拖曳试验或风洞试验获得。对于许多不同形状(如圆柱、平板、立柱等)构件的流力系数可从相关的参考资料查得。

### 3.4.4 流体作用力(静恢复力和流体动力)

船舶或浮式海洋平台在海上除了遭受风、浪、流引起的海洋环境载荷之外,还包括由于自身运动偏离平衡位置而产生的静恢复力,以及因运动而受到周围海水的流体反作用力,即流体动力。

#### 1. 流体静力(静恢复力 Restoring Force)

流体静力  $F_s$  与浮体运动的幅度有关,一般可写为:

$$F_s = -C_{ij} X \quad (3-23)$$

式中:  $X$  为运动的幅度矩阵;  $C_{ij}$  为刚度(Stiffness)矩阵,或称静恢复力矩阵。对于具有对称面

的船舶或浮式海洋平台,静恢复力矩阵可写为:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_w & 0 & \rho g A_w \bar{x}_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho g \nabla \overline{GM}_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_w \bar{x}_f & 0 & \rho g \nabla \overline{GM}_L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3-24)$$

式中:  $A_w$  为水线面面积;  $\bar{x}_f$  为水线面漂心坐标;  $\nabla$  为排水体积;  $\overline{GM}_T$  和  $\overline{GM}_L$  分别为横稳性高和纵稳性高。

可见,对于船舶或浮式海洋平台,只有垂荡、横摇和纵摇运动具有静恢复力,而纵荡、横荡和首摇运动没有静恢复力,其相应的恢复力系数都为零。

## 2. 流体动力(也称辐射力或流体反作用力 Reaction Force)

浮式结构物在非定常的运动过程中,由于物体运动作用于周围的水而使之得到速度和加速度,因而水对物体产生反作用力  $F_R$ 。  $F_R$  包括与运动加速度成正比的附加惯性力和与运动速度成正比的阻尼力,其比例系数分别称为附加质量系数和阻尼系数。

按照线性势流理论,流体动力  $F_R$  的表达式为:

$$F_R = -\mu \ddot{X} - \lambda \dot{X} \quad (3-25)$$

式中:  $\mu$  为附加质量(Added Mass)矩阵;  $\lambda$  为阻尼系数(Damping Coefficient)矩阵。

附加质量和阻尼系数是浮式海洋平台非常重要的水动力参数,将在下一节进行详细介绍。

### 3.4.5 系泊力

浮式海洋平台在水平方向上由于自身没有回复力,所以要定点在特定海域进行海上油气生产作业,就必须依靠定位系统提供恢复力。系泊力  $F_M$  就是定位系统对船舶或浮式海洋平台等浮式结构物的作用力。目前,海上的定位系统应用最为普遍的是系泊系统,对于钻井平台等对定位能力要求比较高的浮式海洋平台,还常常应用动力定位系统。

浮式海洋平台与定位系统是一个整体,因此除了分析浮式海洋平台本身在海上风、浪、流作用下的受力情况,还必须分析定位系统的动力性能以及所提供的系泊力特性。这里主要针对最为常见的系泊系统进行讨论。

一般的系泊系统都是由多根锚泊线,即锚链、缆索或钢丝绳组成,其力学分析通常有下列三种计算方法:

#### 1) 静力分析

将系泊系统看作是弹簧系统,进行静力特性分析求得系泊浮体各个运动方向上的刚度系数或恢复力系数,从而将系泊力作为静恢复力考虑。

#### 2) 准静力分析

通过系泊系统的静力特性分析,求得系泊浮体各个运动方向上的静力特性曲线(即位移—受力曲线),如同一个无质量的非线性弹簧,忽略系泊缆/立管的惯性、流载荷和阻尼等动态特性的影响,从而根据浮体的运动(位移)确定系泊力。在计算得到浮体运动后,系泊缆和立管的动力行为再独立地进行计算。静力特性曲线也称为静恢复力曲线,或位移—受力曲线,直接反映了系泊系统与系泊力之间的关系,是系泊系统最为重要的属性,在工程计算和设计中都有重

要的意义,在模型试验中都要进行相关的试验和校核。

### 3) 动力分析

全面考虑系泊系统所受的外力,包括惯性力、张力、重力、流体动力及海底摩擦力等项,进行动力分析,将浮体的运动与系泊系统的动力分析进行耦合。

大量理论和实验研究都表明,系泊链/立管的动态特性对深水浮式海洋平台运动的影响是显著的,而且水深越大则越显著。如果采用非耦合的准静力计算,忽略系泊链和立管的动态影响,那么数值预报的浮式海洋平台水平面运动及系泊力都将显著偏大。因此,非耦合的准静力分析方法的可靠性和准确性随水深增加而降低,必须考虑采用完全耦合的水动力计算分析方法。目前国际上最先进的数值预报方法和软件都已经采用了耦合水动力计算分析方法。

## 3.5 附加质量、固有周期和阻尼

浮式海洋平台在海上风、浪、流作用下受到各种外力作用,并产生六个自由度的运动。海洋平台的运动与受力之间的关系服从牛顿第二定律,即:

$$F = M\ddot{X} \quad (3-26)$$

式中: $M$ 为海洋平台的质量矩阵; $\ddot{X}$ 为平台运动的加速度矩阵。

将上节所讨论的总外力 $F$ 的各个分项代入式(3-26),并把静恢复力 $F_s = -CX$ 以及流体反作用力 $F_R = -\mu\ddot{X} - \lambda\dot{X}$ 中含有 $\ddot{X}$ 、 $\dot{X}$ 和 $X$ 的诸项移至等式左端,经整理后可得到浮式海洋平台的运动方程为:

$$(M + \mu)\ddot{X} + \lambda\dot{X} + CX = F_w + F_C + F_{WD} + F_M \quad (3-27)$$

这是描述浮式结构物运动与受力的一般表达式,式中各项都应理解为质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、运动矩阵和受力矩阵等,因而是一个矩阵方程。此外,上述运动方程是假定运动为频率的函数推导而得,仅适用于稳定振荡运动的频率域描述。该运动方程的优点是物理概念清楚,便于理解浮式结构物运动与受力之间的关系。

运动方程式(3-27)中,附加质量、阻尼以及与附加质量和刚度系数有关的固有周期,都是船舶与海洋工程水动力学理论与试验研究中非常基础和重要的物理概念,对于船舶或浮式海洋平台运动幅值的计算有重要影响,有必要进行详细的阐述。

### 3.5.1 附加质量

船舶或浮式海洋平台在海上风、浪、流作用下的运动是非定常运动,除了本身受到与加速度成正比的惯性力外,由于物体在运动中作用于周围的水使之得到速度和加速度,根据作用与反作用的原理,水对物体存在反作用力。其中,与加速度成正比的反作用力称为附加惯性力,其比例系数称为附加质量。

例如,力 $f$ 使质量为 $m$ 的物体在真空中作加速运动,则加速度 $a$ 为:

$$a = f/m$$

如果将该物体置于水中用同样的力 $f$ 使之作加速运动,则其加速度 $a'$ 要比 $a$ 小,可以写作:

$$a' = \frac{f}{m + m_a}$$

式中： $m_a$  称为附加质量，它与物体本身的形状和运动方向有关。

船舶或浮式海洋平台的六自由度运动包括直线运动和转动两种形式，与此相应有线加速度和角加速度。对于直线运动的纵荡，横荡和垂荡来说，惯性作用表现为力的形式。物体本身的惯性的质量  $m$ （实际上即为排水量）来衡量，附加惯性分别用附加质量  $\mu_x$ 、 $\mu_y$  和  $\mu_z$  来衡量。对于绕  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴转动的横摇、纵摇和首摇来说，惯性作用表现为力矩的形式。物体本身的惯性的质量惯性矩  $I_{xx}$ 、 $I_{yy}$  和  $I_{zz}$  来衡量，他们可以根据船或海洋平台的质量分布进行计算，其表达式为：

$$\left. \begin{aligned} I_{xx} &= \int_m (y^2 + z^2) dm \\ I_{yy} &= \int_m (z^2 + x^2) dm \\ I_{zz} &= \int_m (x^2 + y^2) dm \end{aligned} \right\} \quad (3-28)$$

式中： $x$ 、 $y$  和  $z$  是微质量  $dm$  在随船坐标系中的坐标位置。

在实际工作中一般按离散的部件进行计算，例如绕  $x$  轴的惯性矩  $I_{xx}$  的计算式为：

$$I_{xx} = \frac{1}{g} \left[ \sum p_i (y_i^2 + z_i^2) \right] + \sum I_{xi} \quad (3-29)$$

式中： $p_i$  为某一部件的重量； $y_i$ 、 $z_i$  为部件重量  $p_i$  的重心在随船坐标系中的坐标； $I_{xi}$  为重量  $p_i$  对通过其重心纵轴的自身惯性矩。

从式(3-29)可以看出，按实际部件重量的分布计算惯性矩  $I_{xx}$ 、 $I_{yy}$  和  $I_{zz}$  是很繁杂的工作。对于普通船型大多采用经验公式进行计算，对于特殊船舶或海洋平台等，则必须按部件进行计算。至于附加惯性矩，则分别以  $J_{xx}$ 、 $J_{yy}$  和  $J_{zz}$  来衡量。

附加质量和附加惯性矩是水对物体的反作用，它们与物体的水下形状和运动方向有关，一般由经验公式或模型试验确定，也可以通过数值方法进行计算。普通船舶的附加质量和附加惯性矩的大致变化范围是：

$$\text{纵荡 } \mu_x = (0.05 \sim 0.15)m$$

$$\text{横荡 } \mu_y = (0.9 \sim 1.2)m$$

$$\text{垂荡 } \mu_z = (0.9 \sim 1.2)m$$

$$\text{横摇 } J_{xx} = (0.05 \sim 0.15)I_{xx} \text{ (无舭龙骨)}$$

$$J_{xx} = (0.10 \sim 0.35)I_{xx} \text{ (有舭龙骨)}$$

$$\text{纵摇 } J_{yy} = (1.0 \sim 2.0)I_{yy} \text{ (视载货情况而定)}$$

$$\text{首摇 } J_{zz} \approx J_{yy}$$

以上所介绍的仅仅是六自由度运动中某一单项运动的附加质量和附加惯性矩。船舶或浮式平台在海上的运动相当复杂，实际上是各自由度运动的综合结果，因而有相互影响的耦合作用。例如，在船舶摇摆运动中既有横摇运动又有纵摇运动时，我们在分析横摇运动时必须考虑纵摇的影响，除考虑附加惯性矩  $J_{xx}$  外，还要计及纵向惯性矩  $J_{yy}$  对横摇的影响  $[J_{yy}]_x$ ，反之亦然。模型在海洋工程水池中试验时，运动情况虽然复杂，各自由度运动的附加质量和附加惯性矩之间的耦合作用实际上都已包括在试验的内涵之中，不需要专门考虑。但在理论数值计算时，必须考虑其耦合作用。例如在理论计算横摇运动时，除考虑附加惯性矩的主项  $J_{xx}$  外，还要计及其余五个运动附加质量和附加惯性矩对横摇运动的耦合影响。船舶或浮式平台在风浪

作用下的复杂运动虽可分解为六个自由度的运动,但在理论计算时,除考虑六个自由度运动中的每一主项  $\mu_x, \mu_y, \mu_z, J_{xx}, J_{yy}$  和  $J_{zz}$  外,还要计及其余五个运动对它的耦合影响。因此附加质量和附加惯性矩实际上共有 36 项,通常以矩阵的形式表达,其中六项是对应于每一运动的主项,其余 30 项是耦合影响项。

### 3.5.2 固有周期

在理论力学中讨论过单自由度弹簧的强迫振动问题,在船舶耐波性中讨论过船舶在波浪作用下的横摇问题。有关这类问题都是以二阶常系数非齐次微分方程式描述,且等式右端是具有一定周期的扰动力。如果弹簧或船舶的固有周期(或称自然周期)与扰动力的周期相等,则将发生共振现象,导致产生很大的振荡幅度。

浮式海洋平台运动方程的左端与单自由度弹簧振动和船舶横摇运动的微分方程相类似,右端的外力中主要是具有周期性的波浪扰动力  $F_w$ 。如果浮式海洋平台的固有周期与波浪的周期相等或相近,则海洋平台在波浪的作用下将产生很大的运动幅度,应该采取措施设法避免。固有周期表达了浮式结构物自身及其系泊系统的特性,在海洋平台的计算与设计具有重要的意义,也是海洋工程模型试验中的主要内容之一。

在 3.4 节已经提到,在海洋平台的六个自由度运动中,横摇、纵摇及垂荡等运动具有复原力矩或复原力,在外力作用下偏离原来的平衡位置,但当外力消失后经过若干次振荡后能恢复到原来的平衡位置。根据这一特点,在模型试验中只需记录振荡的次数及相应的时间,即可十分方便地测得横摇、纵摇及垂荡的固有周期。平台本身的纵荡、横荡及首摇等运动虽然没有复原力矩或复原力,但当配置系泊系统(可视为弹簧系统)后便具有静恢复力的特性,因此在模型试验中是以海洋平台模型配置系泊系统后测量整个系统的纵荡、横荡及首摇的固有周期。对于固有周期的试验测量及分析等内容将在以后有关章节中作专门介绍。

根据运动方程式(3-27),固有周期表达式可写为:

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{M_{ii} + \mu_{ii}}{C_{ii}}} \quad (3-30)$$

具体到横摇、纵摇和垂荡运动,根据式(3-24)所示的恢复力系数,其固有周期分别为:

$$\left. \begin{aligned} T_{\phi} &= 2\pi \sqrt{\frac{I_{xx} + J_{xx}}{\Delta \cdot h_T}} \\ T_{\theta} &= 2\pi \sqrt{\frac{I_{yy} + J_{yy}}{\Delta \cdot h_L}} \\ T_z &= 2\pi \sqrt{\frac{\Delta + \mu_z}{\rho_w A_w}} \end{aligned} \right\} \quad (3-31)$$

式中: $\Delta$  为排水量; $h_T$  为横稳性高; $h_L$  为纵稳性高。

在设计计算的初始阶段,由于技术数据资料不全,常用经验统计公式初步估算相应的固有周期。例如对于一般船舶的估算公式是:

$$\text{横摇固有周期 } T_{\phi} = \frac{0.8B}{\sqrt{h_T}} \text{ (s)}$$

$$\text{或 } T_{\phi} = 0.58 \sqrt{\frac{B^2 + 4z_g}{h_T}} \text{ (s)}$$

式中:  $z_g$  为重心高度(m)。

$$\text{纵摇固有周期 } T_\theta = 2.8 \sqrt{C_{vp} d} \text{ (s)}$$

$$\text{或 } T_\theta = 2.4 \sqrt{d} \text{ (s)}$$

式中:  $C_{vp}$  为垂向棱形系数;  $d$  为吃水(m)。

垂荡固有周期  $T_z \approx T_\theta$ , 即一般船型的垂荡固有周期与纵摇的固有周期大致相同。

### 3.5.3 阻尼

对于海上系泊浮式平台系统, 阻尼应包括浮体阻尼和系泊系统阻尼, 而浮体阻尼又包括: 波浪辐射阻尼(Wave Radiation Damping)、表面摩擦阻尼、旋涡阻尼和波浪漂移阻尼(Wave Drift Damping)。

波浪辐射阻尼是有自由面存在时所特有的现象。当浮体在水面上作振荡运动时, 由于自由面存在, 会有波浪产生并向四周辐射, 而波浪带走的能量就体现为辐射阻尼力的作用。这种阻尼即使把流体假定为无粘性的理想流体也依然存在, 因此也被称为势流阻尼, 可根据辐射理论计算得到。对于船舶的垂荡和纵摇运动, 其运动阻尼的主要成分就是波浪辐射阻尼。

表面摩擦阻尼和旋涡阻尼都是因海水具有的粘性而引起, 因此也被统称为粘性阻尼。对于船舶而言, 粘性阻尼主要体现在横摇阻尼中, 特别是装有舳龙骨的船舶或者具有矩形横截面的船舶, 粘性阻尼会占到横摇总阻尼的一半以上。对于系泊浮体而言, 除横摇阻尼以外, 粘性阻尼还主要体现在低频慢漂阻尼中。系泊浮体的大幅度低频水平面运动, 是由于波浪慢漂力的频率与系泊浮体固有频率相近而形成共振作用所致, 这种共振运动的振幅将主要取决于系统的低频慢漂阻尼。由于振荡频率很低, 波浪辐射阻尼可以忽略, 低频慢漂阻尼就主要包括粘性阻尼。粘性阻尼在理论上难以确定, 一般通过经验数据或者经验公式估算, 也可通过模型在静水中的衰减试验得到。当然, 因无法满足雷诺相似准则, 存在尺度效应的影响, 试验数据须经过适当的修正后才能用于实际。

粘性阻尼无论是在静水中还是在波浪中都是存在的, 但当船舶或者系泊浮体在波浪中作振荡运动时, 其遭受的总运动阻尼比静水中时要大, 这部分增加的阻尼就是波浪漂移阻尼, 或简称为波浪阻尼。与波浪慢漂力类似, 波浪阻尼也与波浪高度的平方成比例。因此在较高海况下, 波浪阻尼将是低频慢漂阻尼的主要成分。例如: 一艘长 235m 的船舶,  $H_s = 8.1\text{m}$  时, 波浪阻尼占到总阻尼的 85%, 而在  $H_s = 2.8\text{m}$  时, 波浪阻尼可以忽略。波浪阻尼是由波浪引起的, 与粘性无关, 可以通过比较系泊浮体在静水和规则波中的自由衰减模型试验结果分析得到, 也可通过一些经过验证的经验公式计算得到。波浪阻尼可看成是二阶波浪力关于慢漂运动速度的梯度, 从而把计算低频运动阻尼的问题归结为计算二阶慢漂力问题, 这是目前比较实用且应用广泛的理论处理方法。

系泊系统随浮体一起运动, 同样将遭受周围海水的粘性阻尼力作用, 成为整个系统运动阻尼的重要组成部分。随着系泊浮式海洋平台的作业水深越来越大, 系泊锚链线的长度随之越来越长, 系泊系统的粘性阻尼占整个系统总阻尼的比例也越来越显著, 有模型试验数据表明这个比例甚至可高达 80%。由于系泊系统的粘性阻尼在理论上也是难以预报, 所以也大多借助模型试验确定, 同样也会存在尺度效应问题。

与分析附加惯性力和附加惯性力矩的情况相类似, 浮体的某一单项运动有其相应的阻尼

力,例如横摇运动的横摇阻尼力矩,垂荡运动的垂荡阻尼力等,因此,六个自由度运动中有与之相应的六个主项阻尼力。对于复杂的运动,各单项之间存在耦合作用,所以粘性阻尼力和阻尼力矩实际上共有 36 项,通常也以矩阵的形式表达,其中 6 项是对应于每一运动的主项,其余 30 项是耦合影响项。

### 3.6 线性系统的响应关系概述

在不规则海浪的作用下,船舶或浮式海洋平台会产生不规则的运动和受力。如果把不规则波  $\zeta(t)$  看作是输入,通过作为能量转换器(或称传递器)的船舶或海洋平台,将其能量传递给作为输出的运动  $y(t)$ 。这里  $y(t)$  可以是横摇  $\varphi(t)$ 、纵摇  $\theta(t)$ 、垂荡  $z(t)$  或其他受力(如系泊力)  $F(t)$  等。图 3-9 为这种转换关系的示意图。

研究船舶等浮体在不规则风浪作用下的运动问题时,都是假定不规则风浪是平稳的正态随机过程,而船舶等浮体也是时间恒定的线性系统。因此问题便归结为线性系统输入与输出之间的响应关系,当输入量是一个平稳的随机过程时,输出也是一个平稳的随机过程。

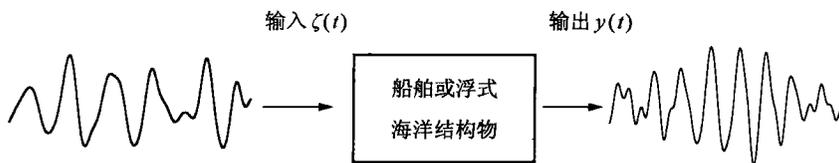


图 3-9 线性系统输入与输出的转换

#### 3.6.1 频域分析法

在频域范围内以频率响应来探讨船舶等浮体在波浪作用下的动态特性称为频域分析法或频率响应法。所谓频率响应就是船舶等浮体系统对不同频率的正弦输入响应的稳态值。如果输入的波浪是正弦函数并以复数表示为  $\zeta = \zeta_0 e^{i\omega t}$ , 则输出的稳定值也是相同频率的正弦函数  $Y = Y_0 e^{i(\omega t + \delta)}$ , 注意到两式中的虚部表示真正的输入与输出。这时的频率响应函数为:

$$H(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{\zeta(i\omega)} = \frac{Y_0}{\zeta_0} e^{i\delta} \quad (3-32)$$

式中:  $\frac{Y_0}{\zeta_0} = |H(i\omega)|$  表示输出对输入的幅值比,也称幅频特性,其平方值  $|H(i\omega)|^2$  称为幅值响应算子,简称为 RAO(Response Amplitude Operator);  $\delta = \arg[H(i\omega)]$  表示正弦输出对正弦输入的相位差,称为相频特性。

因此,作为传递函数在频域分析法中就是频率响应函数  $H(i\omega)$  (为简便起见,常写作  $H(\omega)$ ),包括幅值响应函数和相位响应函数。

频率响应函数是船舶和海洋平台等浮体自身系统的一个非常重要的动态特性,与波浪输入无关。只要知道了系统的频率响应函数,便可得到任意波浪条件作用下系统的线性响应。

对于像不规则风浪那样的随机扰动,输入和输出最方便的表达方式是谱密度函数。谱分析方法中一个重要的结论是,在线性系统中,输出的谱密度  $S_y(\omega)$  等于输入谱密度  $S_\zeta(\omega)$  乘以系统的幅值响应算子 RAO,即

$$S_y(\omega) = S_\zeta(\omega) |H(i\omega)|^2 \quad (3-33)$$

由此可见,谱分析方法的优点在于,作为随机过程的海浪和船舶等浮体运动之间的不确定关系,转化为非随机的谱密度之间的确定关系,而频率响应函数则是建立这种确定关系的关键。

关于船舶等浮体系统的频率响应函数,可以用理论计算方法求得,而较为可靠正确的方法是通过模型试验求得,包括模型在规则波和不规则波中的试验。

如果模型在波幅为  $\zeta_A$  的规则波中试验,测得的运动幅值为  $y_A(\omega)$ ,则运动的频率响应函数为:

$$Y(\omega) = \frac{y_A(\omega)}{\zeta_A}$$

其物理意义表示频率响应函数在数值上等于单位波幅引起的运动幅值。如以船舶或 FP-SO 的横摇为例,模型在波幅为  $\zeta_A$  的规则波中测得的横摇幅值为  $\phi_A(\omega)$ ,则模型的频率响应函数为:

$$Y_\phi(\omega) = \frac{\phi_A(\omega)}{\zeta_A}$$

图 3-10 是模型在一系列规则波中横摇试验的分析结果。

由于不规则波是由许多不同频率和波幅的规则波叠加而成,因此在一系列不同频率(相应于不同波长)规则波中试验得到的频率响应函数,可用以估算不规则波中船舶等浮体的运动性能。

至于模型在不规则波中的试验,是在给定的风浪谱密度  $S_\zeta(\omega)$  情况下,由测量数据的分析中得到运动的谱密度  $S_y(\omega)$ ,从而求得运动的频率响应函数  $H(\omega) = \sqrt{S_y(\omega)/S_\zeta(\omega)}$ 。

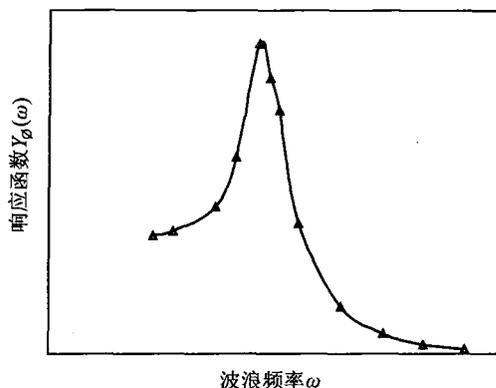


图 3-10 模型横摇试验的频率响应函数

### 3.6.2 时域分析法

在波浪作用下船舶等浮体的动态特性也可以用时域范围内的脉冲响应法来描述,称为时域分析法。这种方法可以得出在不规则海浪作用下船舶等浮体运动的时间历程。只要给定时间域中的某一时刻,便可给出浮体在该时刻的运动数值,因而称为确定性估算。

在该方法中首先引入一个单位脉冲  $\delta(t_0)$  作用在系统上,产生了一个响应  $h(t-t_0)$ ,称为脉冲响应函数。对于船舶等浮体而言,脉冲响应函数相当于船体受到一个短促的突然作用之后的响应,从扰动终止的瞬时起,直到恢复静平衡的整个过程中的动态特性。

令  $\tau = t - t_0$ ,则单位脉冲  $\delta(t_0) = \delta(t - \tau)$ ,其脉冲响应  $h(t - t_0) = h(\tau)$ 。根据线性叠加原理,输入可看作是很多脉冲之和,这时的脉冲即为波面升高  $\zeta(t_0) = \zeta(t - \tau)$ 。经过数学推导,线性系统在  $t$  时刻的输出  $y(t)$  为:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(t - \tau) h(\tau) d\tau \quad (3-34)$$

船舶等浮体在不规则波作用下的  $h(\tau)$  也可用理论计算或模型试验求得。在频域分析法中, 船舶等浮体的动态特性由频率响应函数  $H(\omega)$  来表达。而在时域分析法中, 则由脉冲响应函数  $h(\tau)$  来表达其动态特性。 $H(\omega)$  和  $h(\tau)$  都是系统本身动态特性的反映, 两者之间的关系可由下列傅里叶变换确定, 即:

$$H(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$
$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

模型在不规则波中试验时, 同步采集了波浪、模型运动及受力等各种测量数据, 一般能给出相应于实体长达 1~3 个小时的各种数据的时历曲线。根据这些测量数据即可方便地进行频域分析和时域分析, 有关这方面的内容, 将在本书第 7 章中作比较详细的介绍。

# 第 4 章 模型制作及海洋环境条件模拟

浮式海洋平台在水池中进行模型水动力性能试验的第一道工序是模型制作。平台模型不仅在外形上要 and 实体几何相似,而且与性能有关的参数如重量、重心位置以及惯量等也都要满足几何相似的要求。海洋平台模型试验中的系泊系统和立管系统及防撞垫等也要满足几何相似和力学性能相似的要求。由于模型加工和有关参数的模拟费时费工,一般要耗费一个月左右的时间。因此,实验室在模型制作的同时,也进行试验所规定的海洋环境条件的各项模拟,以便在模型制作完成后立即进行正式的试验工作。本章讨论模型制作和海洋环境条件模拟的有关内容。

## 4.1 模型缩尺比的选择

正确选定一个合适的模型缩尺比 $\lambda$ 是海洋平台进行模型水动力性能试验的首要问题,如果考虑不周,会影响试验研究任务的顺利完成。一般说来,每个试验研究项目都有明确的内容和要求,对于具体的工程项目而言,委托单位已完成了总体设计,并详细提供模型试验的任务书,包括:

- (1) 海洋平台主体的图纸及相关尺寸、重量、重心位置和惯量等重要参数。
- (2) 平台实体在海上配置的系泊系统和立管系统等的布置、几何尺寸及力学特性。
- (3) 海洋环境条件。
- (4) 试验的项目和内容、要求测量的各种数据等。

国际海洋工程界一般公认的最佳模型缩尺比范围为 60~80。然而,在实际选择模型的缩尺比时,应综合考虑试验任务书中规定的各项要求和海洋工程水池本身的功能。下列各项是选择模型缩尺比所需考虑的问题。

### 1) 模型的大小

模型大小是考虑模型缩尺比的首要因素。模型过小会造成尺度效应问题突出,模型制作和模拟的相对精度降低,以及试验测量数据的相对误差增大;模型过大则会受到水池池壁效应的影响,造成水池中过量的波浪反射而干扰正常试验结果。

### 2) 海洋工程水池的主要尺度

根据海洋平台实际的工作水深以及水池能够调节的最大水深,从水深的模拟要求可以得到模型缩尺比的上限。根据海洋平台实体在海上系泊系统的布置以及水池的长度和宽度,从系泊系统伸展范围的模拟要求可以得到模型缩尺比的上限。上述各项都是与模型缩尺比成线性关系,因而从水池主尺度的角度可以初步确定模型缩尺比的上限。

### 3) 海洋工程水池模拟风、浪、流的能力

水池中配置的造风、造流系统的功能都有一定的极限,即能够产生稳定的最大风速和流速。对照试验任务中实际要求的最高风速和流速,注意到实体与模型速度之间的比值是缩尺比的开方,即可以从水池造风、造流系统的功能初步确定模型缩尺比的上限。海洋工程水池的造风能力

一般都能满足模型试验的要求,而造流系统的能力有时会成为缩尺比的重要限制因素。

水池中配置的造波机功能是指能够产生的最大波高和能够造波的波长范围。各种类型造波机的功能都有上下限,即能够产生最长的波(长周期、低频波)和最短的波(短周期、高频波)。按照试验任务中实际要求的最高波浪,对照水池造波机能够产生的最大波高,从两者之间的比值即可初步确定模型缩尺比的上限。另一方面,造波机高频造波的能力,又确定了缩尺比的下限。因为浮式海洋平台的模型试验主要是在不规则波中进行的,而表征不规则波性质的是波谱,它覆盖了相当宽广的波频范围。造波机的机械和控制属性往往限制了高频造波性能,因此试验中模拟不规则波谱时总是要做一定程度的高频截断,缩尺比越大,截断造成的试验误差就越大。因此,在选择缩尺比时应对任务书中规定的不规则波波谱和水池造波机的功能进行对比分析,注意到实体的波浪频率与模型的波浪频率之间有缩尺比开方倒数的关系,即可选取恰当模型缩尺比,以便保证在水池中能够模拟合乎要求的不规则波浪。

#### 4) 海洋工程水池各类仪器的测量功能

浮式海洋平台在水池中进行试验时需要测量的内容很多,诸如风速、流速、浪高、平台模型六个自由度的运动、各根锚链线的受力、平台指定位置处的加速度、甲板上浪以及受到的冲击力等。对于有多个浮体系泊组成的系统,还要求测量多个浮体之间的相对运动,系泊缆的受力以及靠泊力等。由于实验室一般都备有量程大小不同的各类测量仪器,仪器的测量功能通常不是选择模型缩尺比的决定因素,但也应予以考虑。一方面注意到是否有某一仪器的量程上限不能满足测量要求,更重要的是在于选用量程合适的仪器,以保证模型试验中能够正确测得各项数据。

在综合考虑上述各项要求后,一般便可选定合理的模型缩尺比。但是,海洋工程水池的尺度是有限的,而工作水深越来越大的深海平台系统所要求的水池尺度却越来越大,甚至超出了当今世界现有水池的尺度范围,如果按照上述缩尺比范围的规定,在水池尺度上将无法满足深海平台系统模型试验的要求,因此必须探索采用特殊的模型试验方法,有关这方面的问题将在第9章中讨论。

## 4.2 模型制作及相关参数的模拟

模型缩尺比 $\lambda$ 选定以后,根据几何相似的要求进行模型制作,同时对水动力性能相关的各种参数也要正确模拟。本节主要介绍浮式海洋平台主体和上层建筑的制作;重量、重心位置及惯量的调节;锚链、系泊缆、单点系泊系统、立管及防撞垫等的模型制作与力学特性的模拟。

### 4.2.1 海洋平台主体模型的制作

对于主体与船舶形状相同的海洋平台,例如FPSO以及穿梭油轮等,模型制作采用通常船模的制作方法。首先根据实体的总长、垂线间长、型宽、型深、吃水等按缩尺比得出模型的相应数据,其次根据实体的型线图和型值表按缩尺比绘制模型的型线图供船模制造车间加工使用。这类模型通常都是用木质板材粘叠成毛坯,待粘固后在专用的船模切削机床上按型线图依照水线自船底至甲板分层仿形切削,切削完毕后用手工去除多余部分并砂光,最后喷涂二至三道油漆,便制成了与实物几何相似的主体模型。在制作主体模型时,必须注意的事项是:

(1) 模型的舷侧形状如舷墙等要与实物一致。

(2) 模型在试验过程中不能变形,要有足够的强度,通常船模两侧的厚度常在 4cm 以上。

(3) 模型在水池中试验时不能漏水,各层木板之间粘合要牢固水密。

其他类型的浮式海洋平台,如半潜式平台、张力腿平台及单柱式平台等,甲板以下的形状比较复杂多样。例如半潜式平台由上层模块、立柱以及没入水中的简易船形浮箱等组成,立柱之间还有管形桁架支撑。因而在制作这类平台时,首先根据实体的设计图纸按缩尺比绘制模型加工总图,各分件的外形、尺度等常需绘制分图。制作材料一般采用有机玻璃、泡沫塑料、PVC 塑料板材和管材、木质板材、纤维玻璃钢、铝合金、轻型薄铁管等。模型加工的原则是:各分件都要严格按几何相似的要求制作,各分件加工完毕后,按模型总图标明的位置及尺寸进行拼装。固接的方法采用强力粘胶剂(木质与塑料管体之间)、焊接(钢铁金属件之间)或用埋头螺钉等与平台本体连接。各连接点处要求光滑平整、水密、具有足够的连接强度,以免在水池中试验时发生变形或漏水等现象。拼装固接成形后,最后喷涂油漆,制成与实物几何相似的主体模型。

模型加工是一项比较精细的技艺,对于制作的精度有一定要求。对于像 FPSO 那样的船模,国际船模试验池会议(ITTC)规定:一艘长度 5m 左右的模型,总长的误差不能超过 3mm,吃水的误差不能超过 1mm。其他类型海洋平台的加工精度可参照执行,但吃水的误差不能超过 1mm。

模型主体的加工,既要在外形上保持与实体几何相似,在总体上满足加工精度的规定,又要具有足够的强度和水密。另外,特别需要注意对模型本身重量的控制,这是因为模型重量、重心位置以及惯量的模拟,是靠移动、调节模型内的压载重量来实现的。如果模型本身的重量过大,则将没有调节的余地,不得不为减轻模型的自重而返工。一般说来,模型本身的重量,最好控制在试验排水量的 2/3 左右,以便有 1/3 的压载重量用于调节各种技术参数。

#### 4.2.2 上层建筑模型的制作

海洋平台甲板以上的上层建筑模型,是根据实体的总布置图按照相同的模型缩尺比制作。在实体的总布置图上,通常都给出了上层建筑各部分的形状、尺寸及在甲板上的位置。对于大尺寸的上层建筑部分,如居住工作舱室的外形、直升机起降平台、废气燃烧塔、油水分离及污水处理的圆柱筒体等,一律按几何相似要求进行加工,采用的材料有木材、塑料板材、塑料圆管、硬质泡沫塑料厚板等。采用的材料以便于加工制作为原则。对于甲板上小型物件,如通风筒、带缆桩、导缆柱、防护栏杆等,因尺度太小,很难按几何相似要求制作,可进行适当简化,用受风总面积大体相当的方形物体替代,或干脆不予考虑。由于甲板上小型物件受到的风力所占比重很小,作上述简化处理不会影响试验结果的精度。

上层建筑各部分的模型加工完毕后,根据实体的总布置图按几何相似要求,布置在模型甲板上的相应位置,并以粘接剂固定在甲板上,便完成了上层建筑模型的制作。为了美观醒目起见,海洋平台模型的主体和上层建筑分别以反差较大的不同颜色的两种油漆喷涂。

模型主体和上层建筑加工完毕后,应在报告中给出相应的照片,如图 4-1 所示。

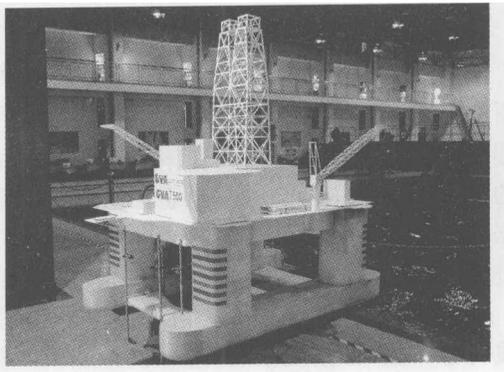


图 4-1 海洋平台主体及上层建筑模型的照片

### 4.2.3 模型重量、重心及惯量的模拟

外形及上层建筑几何相似的模型制成后,需要根据海洋平台实体的数据,对模型的重量、重心位置及惯量等技术参数进行调节模拟,以保证模型与实体的质量和质量分布相似。这些参数直接影响到海洋平台在海上风、浪、流作用下的运动及受力。下面以 FPSO 的模型为例,分项进行说明。

#### 1. 重量的调节

首先将制作完工的空船模型和上层建筑以及需要装在模型上的测量仪器、系泊支撑设备等称量,其重量记作  $W_0$ 。同时根据实体的排水量以缩尺比的三次方和水的密度修正算出船模相应的排水量  $\Delta_m$ 。这是模型试验要求的排水量,也是需要满足的船模总重量。 $\Delta_m - W_0 = W_T$  是需要配置的压载重量,挑选适量的标准压铁块及零星小重量的铁块,并称重复调节,使压载的总重量达到  $W_T$ 。然后把这些压铁全部装入模型内,这样便完成了模型重量的调节。

#### 2. 重心位置的调节

重心位置通常以坐标  $(x_g, y_g, z_g)$  来表示。对于 FPSO,其船体形状及设备布置都与纵中剖面相对称,因而  $y_g = 0$ 。因此,重心位置的调节一般就是指模型的重心纵向位置  $x_g$  和垂向位置  $z_g$  调整至所需的位置。FPSO 在静水中平衡时重心与浮心在同一铅垂线上,即浮心纵向位置  $x_B$  等于重心纵向位置  $x_g$ ,而重心高度  $z_g$  则大于浮心的高度  $z_B$ ,实体的这些数据都是给定的。

模型的重心位置及惯量的调节是在实验室的专用调节架上进行的。调节架上部的中间位置两侧装有水平的刀口,可支撑调节架移动部分和船模的总重量。在进行模型重心位置的调节时,先将船模吊放在调节架内,这时调节架及其中的船模都由刀口支撑并能绕支撑轴线在纵向自由摆动,如图 4-2 所示。

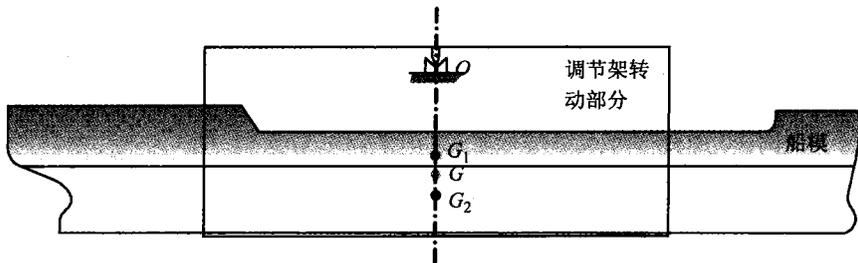


图 4-2 船模及其惯量调节架

图中:  $O$  是支撑点;  $G_1$  是调节架的重心,  $G_2$  是船模的重心,  $G$  是两者的合成重心。调节架转动部分的重量  $W_1$ 、重心垂向位置为  $z_{G1}$ 、基准面至刀口转动轴的垂向高度  $z_0$  以及绕刀口水平轴的惯性半径都是已知的。至于船模的重心位置  $G_2(x_{G2}, z_{G2})$ , 根据实体的数值可折算成模型数据, 这是按要求所规定的数值。所谓模型重心位置的调节, 就是通过移动船模内部压铁的位置进行调试, 使船模重心位置  $(x_{G2}, z_{G2})$  符合所规定的要求。

模型重心纵向位置  $x_{G2}$  可通过水平调试获得。在测试之前先把船模内部的压铁初步安排成对称布置, 根据规定的  $x_{G2}$  数值在船模两侧舷边标明重心纵向位置, 纵向平移整个船模的位置使  $x_{G2}$  的标记与刀口转轴在同一垂直面内。然后将船模内的压铁进行纵向移动调节, 当调节到能使调节架的转动部分和船模处于水平的平衡位置时, 即表明模型的重心纵向位置已在

规定的  $x_{G2}$  处。

模型重心垂向位置  $z_{G2}$  的调节是通过纵向倾斜试验获得。参见图 4-3 所示的倾斜试验原理图,在刀口垂直面内的船模甲板上放置一已知重量的砝码  $P$ ,将砝码  $P$  向后移动距离  $d$ ,则船模连同调节架便产生纵倾,设平衡于纵倾角  $\theta$ ,则对于支点  $O$  的力矩有:

$$Pd \cos \theta = W_1(z_0 - z_{G1}) \sin \theta + \Delta_m(z_0 - z_{G2}) \sin \theta$$

$$\text{或 } \tan \theta = \frac{Pd}{W_1(z_0 - z_{G1}) + \Delta_m(z_0 - z_{G2})} \quad (4-1)$$

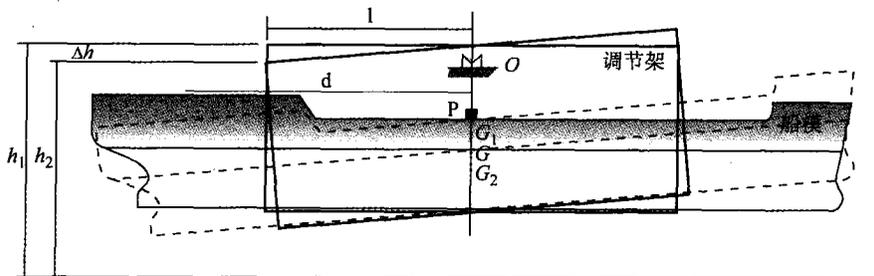


图 4-3 倾斜试验原理图

为了测得  $\tan \theta$ ,在离支点  $O$  的后方  $l$  处置一标尺并在船模舷边装上指针。设船模在水平位置未移动  $P$  时的指针读数为  $h_1$ ,将  $P$  移动距离  $d$  后船模平衡于纵倾位置时指针的读数为  $h_2$ ,则倾斜值为  $\Delta h = h_1 - h_2$ ,而  $\tan \theta = \Delta h / l$ ,由此可得  $\Delta h$  与  $z_{G2}$  的关系为:

$$\Delta h = \frac{Pdl}{W_1(z_0 - z_{G1}) + \Delta_m(z_0 - z_{G2})} \quad (4-2)$$

上式右边各项都是已知数值,于是可计算得到目标倾斜值。对重心高度  $z_{G2}$  的调节便是将船模内部的压铁沿垂向上下移动,直到调节至  $\Delta h$  达到目标值为止。

### 3. 惯量的调节

在完成船模重心位置的调节工作后,取下砝码  $P$  并使模型回复到水平平衡状态。接着进行模型惯量的调试。以纵向惯性矩的调试为例进行如下说明。

根据分布质量的单摆振荡原理、惯性矩的定义以及平行轴定理,可以得到调节架和船模纵向摆动周期  $T$  与船模绕其质心的纵向惯性半径  $K_{yy}$  的关系如下:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W_1 I_1^2 + \Delta_m [(z_0 - z_{G2})^2 + K_{yy}^2]}{g [W_1(z_0 - z_{G1}) + \Delta_m(z_0 - z_{G2})]}} \quad (4-3)$$

上式右端的各项都是已知数值,其中  $K_{yy}$  是根据实船数据折算成的模型数值,也是纵向惯性调节要求满足的数值。如将模型要求的  $K_{yy}$  值代入式(4-3),即可算出摆动周期  $T$  的目标值。因此,纵向惯量的调节便成为在船模同一水平面内前后对称地纵向移动压铁,并让船模和调节架做纵向摆动,用秒表读得摆动周期  $T_m$ ,如果  $T_m > T$ ,则可在船模中对称地纵向向内移动压铁,反之则向外移动,直到  $T_m = T$  为止。

船舶对垂直轴的惯性矩(首摇惯量)在数值上与纵摇差别不大,通常认为  $K_{zz} \approx K_{yy}$ ,因此对  $K_{zz}$  不需要另行测试。但对其他类型的浮式海洋平台, $K_{zz}$  与  $K_{yy}$  差别明显,需要另行调节。

船模横向惯性矩的测试原理和测试过程与纵向惯性矩的测试相类似。但横向惯量调节架的转动部分与纵向不同,调节架的有关参数也不同,需要分别调试测量。在有些情况下,任务书中只给出实体的横摇固有周期  $T_\phi$ ,这时实验室应事先按缩尺比算出船模相应的横摇固有周

期  $T_{\text{船}}$ , 并将船模吊入水池, 让船模在静水中作自由横摇衰减运动, 用秒表读得横摇周期  $T'_{\text{船}}$ , 如果  $T'_{\text{船}} \neq T_{\text{船}}$  (所要求的数值), 则在船模中同一水平面内横向对称移动压铁, 直到测得的横摇周期满足要求的数值为止。

船模重量、重心位置及惯量的调节模拟, 对试验结果的正确性至关重要, 在调节过程中必须注意下列各点:

(1) 完成船模的重量模拟后在船模内不能增减压铁。

(2) 完成重心位置 ( $x_g, y_g, z_g$ ) 模拟后在船模内不能随意移动压铁的位置, 在调节纵向惯性矩时只能在转动轴前后水平纵向对称地移动相同重量的压铁, 在调节横向惯性矩时只能在纵剖面左右对称地水平横向移动压铁。总之, 不能因调节惯量移动压铁而影响调试好的重心位置。

(3) 在所有调试工作完毕后, 应将船模内的压铁编号, 划好压铁的布置图, 同时将所有压铁加以牢靠固定, 以免在试验时船模内的压铁发生移动、倾侧或碰撞等现象。

#### 4.2.4 锚链及系泊缆的模拟

浮式海洋平台的系泊链常用锚链、钢丝绳、强力尼龙缆等组成。由于系泊链在水中呈悬链线状, 与周围的海水有相对运动而受到水流的作用, 因而对系泊链的模型要求按实体根据几何相似和弹性相似进行制作和模拟。

##### 1. 系泊链本身外形的几何相似

根据实体系泊链的尺寸 (长度和直径) 按缩尺比选用模型系泊链的长度和直径。对于锚链和钢丝绳, 模型选用微型锚链和钢丝绳模拟; 对于尼龙缆, 模型选用软绳或微型钢丝绳模拟。

##### 2. 系泊链悬链线形状的几何相似

为了保证实物和模型的系泊链在静水中的悬链线形状几何相似, 必须使两者单位长度的重量相似。一般来说, 满足长度和直径几何相似的模型系泊链的单位长度重量不会直接满足相似要求, 为此需要根据实体系泊链的重量按相似要求算出模型链的重量, 然后将模型链加上配重 (一般用细软的保险丝) 用称重的办法得到满足要求的模型链重量。最后将保险丝截成等长度 (1~2cm) 的若干小段, 并将每一小段在模型链全长均匀而离散地绕紧, 由此得到的模型系泊链基本上达到了悬链线形状几何相似的要求。

##### 3. 弹性系数 (拉伸刚度) 相似

浮式海洋平台在风、浪、流中运动时, 系泊链会受到拉力而伸长变形, 在制作模型系泊链时还要求满足弹性系数相似, 才能使模型试验中系泊链受到的拉力及其伸长变形与实体相似。弹性系数是指拉力与伸长变形 (应变) 之间的关系, 计算公式为:

$$\frac{F}{\Delta l} = \frac{EA}{l} \quad \text{或} \quad \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{EA} \quad (4-4)$$

式中:  $l$  为系泊链长度;  $\Delta l$  为受到拉力  $F$  后的伸长;  $\frac{\Delta l}{l}$  为应变;  $E$  为弹性模数;  $A$  为截面积;  $EA$  也称为截面刚度。

实际上, 模型试验中根据几何相似选用的系泊链模型的弹性系数一般很难满足弹性系数相似的要求。为了解决原型与模型之间的弹性模拟问题, 在模型系泊链上配接合适的弹性系数和长度的弹簧, 是普遍采用的模拟方法, 但应注意两点: 一是模型系泊链加上配接弹簧后的

长度要与实物锚泊线的长度几何相似；二是配接的弹簧在试验范围内受力后的变形伸长，必须在弹性恢复的范围之内，不允许出现永久性变形。

对于锚链和钢丝绳，实物的受力  $F$  与应变  $\frac{\Delta L}{L}$  之间成线性关系（即  $EA$  为常数），一般可根据式 4-4 计算得到。试验中采用一根弹性系数恒定的弹簧即可满足要求。对于弹性系数的模拟过程为：

(1) 根据计算得到的实体弹性系数换算至模型值。

(2) 采用根据几何相似制作完成的系泊链模型，测量弹性系数，并计算配接弹簧所需要的弹性系数值。

(3) 挑选弹性合适的弹簧，计算并截取所需要的弹簧长度。

(4) 组合而成系泊链模型，通过挂砝码重量  $F$ ，测量伸长量  $\Delta L$ ，得到  $F$  与  $\frac{\Delta L}{L}$  的关系。如果与所要求的  $F \sim \frac{\Delta L}{L}$  曲线差异较大，则重新进行调整和测量，直到得到满意的结果为止。

对于尼龙缆绳之类的系泊缆，实物的受力  $F$  与  $\frac{\Delta L}{L}$  之间呈非线性关系。应根据给定的实体缆绳  $F \sim \frac{\Delta L}{L}$  曲线，在模型系泊缆上配接 2 根（或以上）不同弹性的弹簧，并采用相应连接方式，进行反复试验调整，以便得到满意的模拟结果。

图 4-4 为模型系泊链弹性曲线模拟结果的实例。

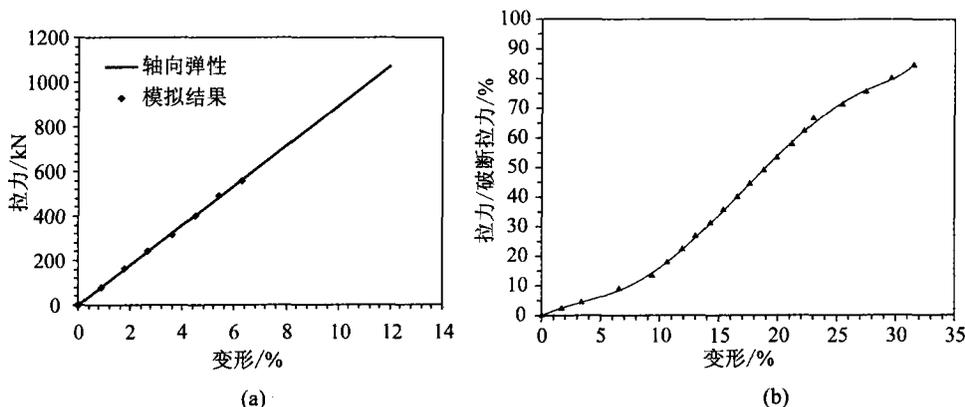


图 4-4 模型系泊链弹性模拟曲线

(a) 锚链、钢丝绳；(b) 尼龙缆

在深水条件下，实际平台的每根系泊链往往是用锚链、钢丝绳、强力尼龙缆等多段组合而成。对于这类组合系泊链的模型制作及其模拟也应采用分段组合的方法，首先对实体的各段分别进行几何相似、配重和弹性模拟，然后将满足相似要求的各段串接起来便组成了一根总的模拟系泊链。

此外，在海洋平台系泊悬链线的适当位置常挂有小型重块或浮筒，借以改变悬链线在水中的形状达到稳定或减缓其运动的目的。在这种情况下，模型系泊链应在几何相似的位置也要挂上小型重块或浮筒的模型，而且其外形和重量都要与实物相似。

某次试验中的组合系泊缆模型如图 4-5 中照片所示。此系泊缆自上（与转塔连接）而下

(与海底锚连接)由四段组成,分别为钢索、上段锚链(其间以均匀间隔串连三只重块)、下段钢索和末端锚链,因此,模型制作和模拟时必须对其中的每一段都进行相应的模拟,最后再串接在一起。

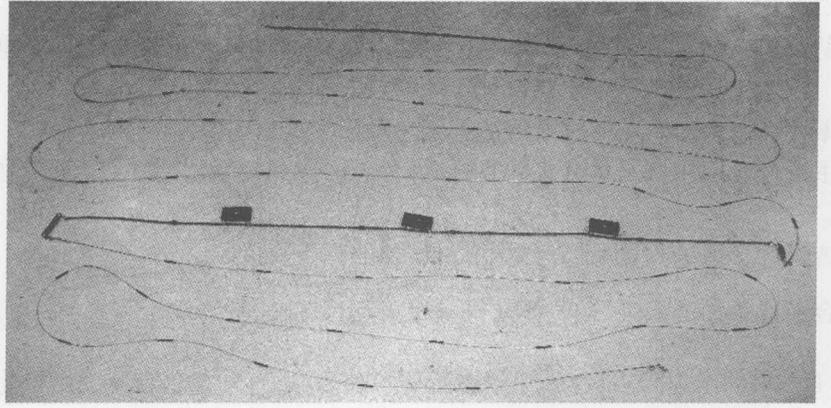


图 4-5 组合系泊缆模型照片

#### 4.2.5 立管的模拟

立管的模拟与系泊缆的模拟类似。对于实体的长度、直径、形状、单位长度重量、轴向弹性等物理属性,都要求根据几何相似和弹性相似进行制作和模拟。

##### 1. 立管形状的几何相似

根据实体立管的尺寸(长度和直径)按缩尺比选用模型立管的长度和直径。对于垂直刚性立管,模型选用微型钢丝绳进行模拟;对于柔性立管,由于实体的弯曲刚度非常小,模型的制作需要选用特制的、非常柔软的空心塑胶软管进行模拟,以保证具有相似的几何形状。

刚性立管一般在张力的作用下具有张紧垂直的外形,因此采用几何相似的微型钢丝绳进行模拟后,试验中在张力作用下的外形也会保持相似的垂直外形。其单位长度重量的模拟与系泊缆的模拟方法相同。

柔性立管在水中的形状相对复杂。对于用作油气和水等液体传输的柔性立管,直径和重量一般比较大,往往加装水中浮筒以支撑部分重量,减小上端张力,因此具有称为“Lazy-S”的形状;对于用作电缆传输的柔性立管,直径和重量一般比较小,有时在水中加装分布式的小浮块以支撑部分重量,减小上端张力,因此外形具有称为“Lazy-Wave”的形状。对于柔性立管水中形状的模拟,一方面需要正确模拟水中浮筒或者小浮块的尺寸、形状、重量、浮力、布置方式,另一方面也需要正确模拟立管的单位重量,保证单位长度的重量相似。对单位重量的模拟,由于不能破坏模型立管的外形,所以需要在柔软的空心塑胶软管的里面进行,而模型立管的直径一般都是很小的毫米量级,如何在其里面放置均匀分布的微小重量以模拟单位重量,面临非常大的困难。通常采用比模型立管直径小得多的微型钢丝绳,根据通常系泊缆单位重量的模拟方法模拟立管的单位重量,然后将缠绕有均匀分布微型配重的微型钢丝绳穿入空心塑胶软管并密封,防止进水。这样制作完成的模型立管放置于水中,就可以模拟出实体的特殊形状,保证几何相似。

## 2. 弹性系数(拉伸刚度)相似

立管的张力往往是模型试验中关注的动力响应参数之一,因此需要对立管的轴向拉伸刚度进行正确的模拟。与系泊缆的模拟类似,立管弹性的模拟也需要通过配置合适的弹性和长度的弹簧来完成。确定弹簧弹性和长度的过程,与系泊缆的模拟完全相同,不再赘述。

某次试验中的柔性立管模型如图4-6中照片所示。图中上方左侧照片(a)所示为已经穿入均匀缠绕单位重量的细钢丝绳而且两端连接弹簧的空心塑胶套管,以模拟尺寸较大的柔性立管。图中上方右侧照片(b)所示为中间绕有均匀分布小浮块而且均匀缠绕有微小单位重量的空心塑胶套管,以模拟尺寸较小的柔性立管。图中下方照片(c)为已经在水池中布置完毕,与FPSO转塔式系泊系统在一起的所有立管的模型。

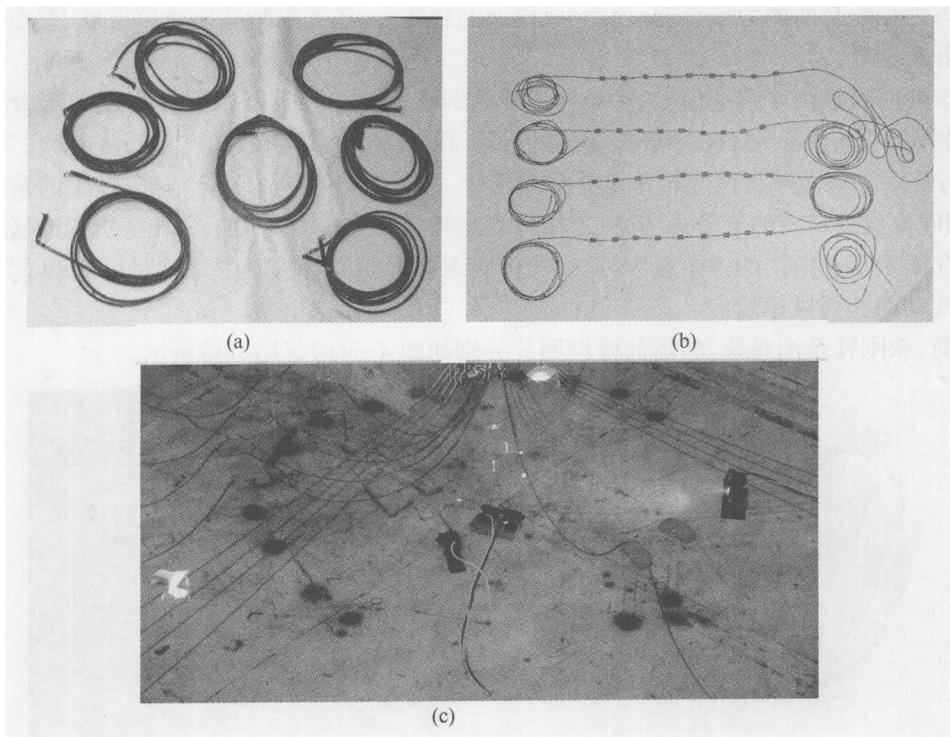


图4-6 柔性立管模型照片

### 4.2.6 单点系泊装置的模型制作与模拟

由于FPSO已成为当今海洋石油开采的主流设施,因而相应的模型水动力性能试验研究的项目较多。为了获得风标效应,FPSO通常采用单点系泊系统,包括单锚腿浮筒系泊系统、悬链腿浮筒系泊系统、塔架式软刚臂系泊系统和转塔式系泊系统,以上单点系泊系统参阅本书第1章图1-8~图1-10。每种单点系泊系统有其各自的特点,在模型制作上需分别考虑。

单锚腿和悬锚腿浮筒系泊系统中有关锚泊线的模拟已在4.2.4一节中进行了专门的介绍,这里主要讨论浮筒本身的模型制作和有关参数的模拟。由于浮筒本身在风、浪、流作用下产生运动和受力,浮筒上又布置了油气开采设施,因而其模型制作的要求基本上与浮式海洋平台相同。浮筒甲板以下的主体根据实体图纸按缩尺比进行加工,甲板以上的上层建筑部分也

需按照实体的总布置图进行加工制作,并根据几何相似要求固接在浮筒的主甲板上。浮筒的上层甲板一般供 FPSO 系泊连接,所以上层甲板及其设施应独立于浮筒本身结构,二者之间靠装在中心的转动轴相连接,并可自由旋转。对于浮筒的重量(设计排水量)、重心位置以及惯量等参数需在模型内用调节压载的方法进行模拟,以获得规定的数值。模型制作的精度以及浮筒的吃水误差以不超过 1mm 为标准。

塔架式软刚臂系泊系统的模型按规定的缩尺比、参照实物的设计图纸进行制作。除固定在海底的钢架和 FPSO 首部的支架外,其余软刚臂、吊杆及各个运动和转动连接结构都比较复杂,精度要求很高,模型制作所用的钢管、接头及连接机构等材料都要经过精细加工,各种尺寸需仔细校核后进行装配。由于试验中需要测量各连接机构处的受力情况,在模型制作时应考虑安装与之相配套的测力传感器。在完成模型的制作后,还要求精确地模拟重量、重心位置及重量的分布情况。

对于转塔式系泊系统的模型,除悬挂锚链的圆盘及突出在 FPSO 船体下端的部分要按几何相似制作外,其余部分一般不必按实体的外形制作,也不需调节重量、重心等参数。为了使 FPSO 与转塔之间能够自由旋转并承受系泊载荷,这套机构的制作十分精细,加工的精度要求很高,同时要放置精密的五分力传感器,用以测量转塔受到的力和力矩。转塔机构的这套模型紧密套在固定于船模内的弹子盘中,这样便可实现模型在风、浪、流中试验时,FPSO 能够绕转塔自由转动而获得风标效应。

浮筒、软刚臂系泊系统、转塔的模型照片分别如图 4-7(a)、(b)、(c)所示。

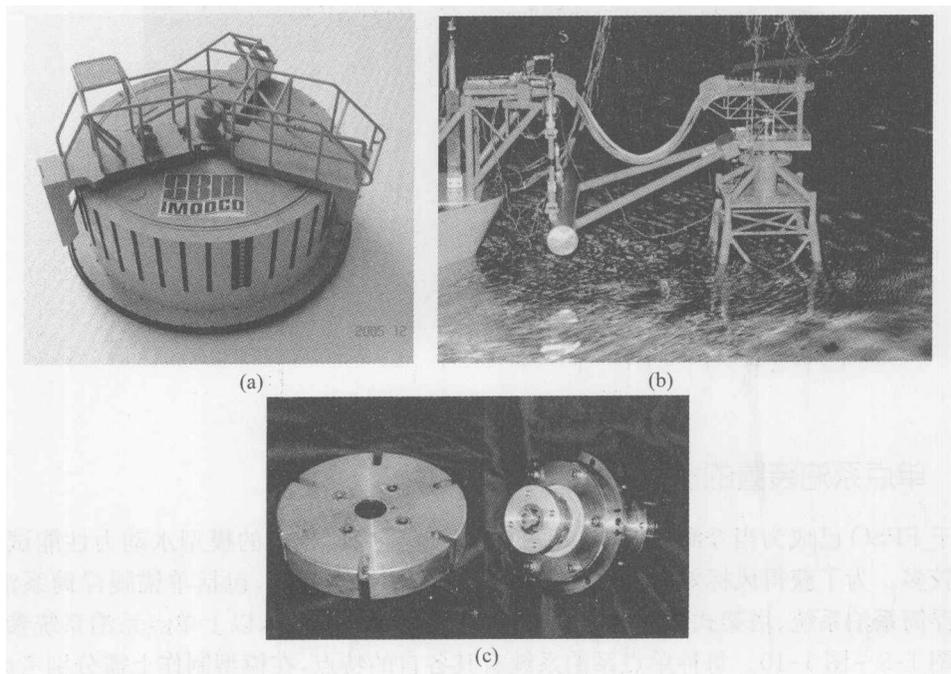


图 4-7 单点系泊装置的模型  
(a) 浮筒;(b) 软刚臂系泊系统;(c) 转塔

#### 4.2.7 防护垫的模拟

为了避免海洋平台与靠泊辅助船之间碰撞而损伤结构,常设置防护垫予以缓冲而起到保

护作用。单柱式海洋平台圆柱形壳体的内侧,与位于其中的刚性立管和浮力罐之间在海上风、浪、流作用下有相对运动,为了避免碰撞损伤,在圆柱形壳体的内侧四周从上到下设置了若干防护垫,在试验中往往要求测量碰撞压力。

防护垫模型在制作上要求接触表面和厚度几何相似,在性能上要求弹性相似。在制作方法上采用夹心饼干形式(或称三明治式),即外表面和内表面用硬塑料薄片或薄铁片模拟表面形状,中间垫以适当厚度的弹性软橡皮块或弹性塑料块。夹心饼干式防护垫模型的厚度应与实体的厚度几何相似。

实体防护垫的制造厂商,通常以作用在防护垫上的压力  $F$  和压缩变形  $\frac{\Delta t}{t}$  的数据或曲线表示其弹性,其中  $t$  为防护垫的厚度,  $\Delta t$  为受压力  $F$  后的厚度压缩。据此,模型的弹性变形可用试验方法得到,即在防护垫模型的表面放置重量为  $F$  的砝码,量出厚度的压缩  $\Delta t$ ,通过调整更换夹在中间不同弹性的橡皮块或塑料块,便可得到与实物弹性相似的模型防护垫。图 4-8 为模型防护垫弹性模拟的结果。

单个防护垫模型制成后,对其余所需的防护垫模型按同样方法制作。然后将防护垫的所有模型按照与实体几何相似的布置原则,用强力粘接剂固定于平台模型的相应位置。对于要求测量碰撞压力的防护垫,在模型中还要配置压力传感器,总的安装要求是既能测得碰撞压力,又不影响防护垫模型的弹性。

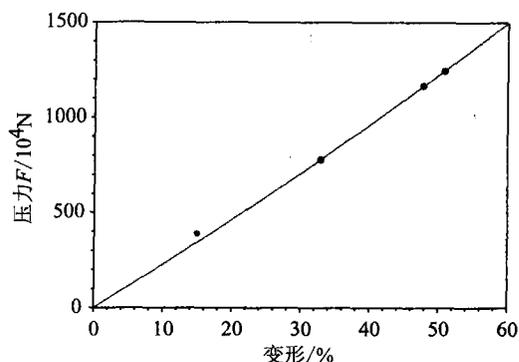


图 4-8 防护垫厚度压缩变形模拟结果

### 4.3 模型试验的海洋环境条件

海洋平台长期在海上生产作业,会遇到千变万化大小不同的风、浪、流海洋环境条件。其中两种海况最为重要,一是极其严酷的海况,海洋平台要能够抵挡这种风、浪、流侵袭而不致损毁,所以称为极限海况或平台的生存海况;二是相对不太严重的海况,平台上的各类生产设施尚能正常运转,工作人员能忍受晕船坚持生产作业,这种海况称为作业海况。因此,海洋平台模型在水池中主要对上述两种海况的风、浪、流作用下进行试验。

#### 4.3.1 极限海况

对于固定式海洋平台而言,试验的目的是确定在最严酷的风、浪、流条件下承受的最大载荷,以此来判断平台本身的结构强度和固接于海底基桩等能否抵挡此最大载荷而不致损毁。国际海洋工程界普遍认同:以百年一遇的海浪作为极限海况,至于风和流的条件可随同百年一遇的波浪选取。在习惯上以比较稳妥而保守的假定,把百年一遇的风、浪、流以同一方向作用于固定平台,作为试验的极限海况。

浮式海洋平台是一个相当复杂的浮体动力系统,平台本身在严重海况下会产生剧烈的运动,但同时受到系泊系统的牵制,两者有相互影响,而浮式系统所受到的载荷和响应并非完全由波浪所主宰。更为复杂的情况是:

(1) 平台所受到的最大响应和载荷(包括系泊缆响应)并非在百年一遇风、浪、流的方向一致时发生,在风、浪、流不同方向作用于浮式海洋平台时常会产生最大的响应和载荷。

(2) 因系统本身的周期和波浪周期之间的关系等诸多因素,整个浮式系统最严重的波浪响应可能在小于百年一遇的波浪时发生。

浮式平台模型试验的目的是希望获得最大载荷,以此来判断平台本体的结构强度是否能抵挡而不致损坏,系泊锚链是否能抵抗而不致断裂。但从上述粗略的讨论中可以看到,对于浮式海洋平台而言,很难直接选择某一特定的海况作为极限海况。目前对浮式海洋平台模型试验极限海况的选取是:

(1) 风、浪、流同方向情况(Collinear Condition) 采用百年一遇的波浪、百年一遇的风速和流速组合,以同一方向作用于浮式海洋平台。

(2) 风、浪、流不同方向情况(Non-collinear Condition) 风、浪、流都选取上述百年一遇的数值,但选择若干不同方向的组合作用于浮式海洋平台。

#### 4.3.2 作业海况

所谓作业海况,是指海洋平台在这种海况作用下,所有生产设备和工作人员尚能坚持正常生产作业。从这个意义上来说,作业海况是海洋平台能够进行生产作业的最高海况。

作业海况的风浪恶劣程度远低于生存状态的极限海况,即风速、流速和波高等都较生存状态的极限海况要低很多,粗略说来,大体相当于6级海况或7级海况。国际海洋工程界一般以平台作业海域一年一遇或者十年一遇的风、浪、流条件作为作业海况。在模型试验时要明确规定风、浪、流的具体数值和选择若干不同方向的组合。

海洋平台模型在作业海况下进行试验,主要测量其运动响应和加速度等多种数据,并换算至实体。据此可以判断平台上的各类设施、仪器仪表能否正常运转,是否超过工作人员能够坚持生产、忍受晕船的标准等。

就海洋工程的具体项目而言,在任务书中都明确规定了极限海况和作业海况的风、浪、流具体条件,海洋工程水池只需按照给定的条件正确模拟相关的风、浪、流数值及不同方向的组合。

海上的风浪情况与海区的地理位置有很大关系。为了使读者了解大体的数量概念,表4-1给出了世界范围风浪出现的概率。

表 4-1 世界范围风浪出现的概率

蒲氏风级	浪高/m	出现概率/%
5级以下	<2.5	83.1280
6~7级	2.5~4.0	12.8005
8级	4.0~6.0	3.0253
9~10级	6.0~9.0	0.9263
10~11级	9.0~14.0	0.1190
12级	>14.0	0.0009

粗略说来,海洋石油平台能够在海上进行生产作业的时间一般在85%以上。

为使读者对极限海况和作业海况的风、浪、流严重程度的差异有更直观的了解,顺便列出了某一作业于美国墨西哥湾的浮式海洋平台工程项目的数据以供参考。

(1) 极限海况 风速 43.8m/s,流速 1.29m/s,有义波高 15.55m。

(2) 作业海况 风速 20.6m/s,流速 0.62m/s,有义波高 3.05m。

除上述两种海况外,有时还要求进行低于作业海况的风、浪、流情况下的模型试验,并将这种海况称为疲劳海况。顾名思义,疲劳海况是指海洋平台在作业过程中经常会遭遇,可能会引起平台与系泊结构在长期作业过程中因承受海洋环境载荷而产生疲劳损坏的风、浪、流条件。此外,为了保证平台从制造工厂安全运往油田以及在油田就位、安装等需要,常在规定的低海况(一般相当于4级海况)条件下进行相关的模型试验。

## 4.4 风的模拟

海洋工程水池中风的模拟是由专门的造风系统来实现的。造风系统包括交流电动机、轴流风机组、测量风速的仪器以及计算机数据采集系统和计算机控制系统等。通常造风系统大多是可移动式,便于产生不同方向的风速,而且普遍采用局部造风,但其造风的稳定区域必须足以覆盖海洋平台模型试验的运动范围。

轴流风机组在交流电机的驱动下旋转并产生风速。采用变压器调节电压可以控制电机和风机转速,形成不同的风速。也可由先进的数字变频器控制输入驱动电机的电压,从而改变转速,形成不同的风速。

### 4.4.1 定常风的模拟

许多浮式海洋平台模型试验研究仅要求模拟定常风。所谓定常风是指风速恒定不变的风,试验任务书中规定了实体的平均风速(一般包括生存状态和作业状态时的风速)和若干风向。国际上规定的平均风速一般是指海平面上方10m高度处的风速,因此实验室应将风速仪按照缩尺比放置于水面上对应于实体10m高度处测量模拟的风速。

模型试验中需要模拟的风速 $V_{wm}$ 可以从规定的实体平均风速 $V_{ws}$ 按下式求得:

$$V_{wm} = \frac{V_{ws}}{\sqrt{\lambda}} \quad (4-5)$$

式中, $\lambda$ 为模型的缩尺比。

至于风向的模拟,可将移动式风机组在水池中置于规定的不同方向进行。

定常风速的模拟相对比较简单,一般可手动调节变频器的频率,控制驱动电机输出电压和电机及轴流风机的转速,使产生的模拟平均风速达到要求即可。使用的风速仪也比较简单,一般用叶轮风速仪(风杯)直接测得平均风速。

风场测量(即造风的稳定范围)是模拟风速的重要内容,主要是检验稳定的造风区域是否足以覆盖试验中模型的运动区域。测试内容包括沿着风向(长度范围)和垂直风向(横向宽度范围)的若干空间点处所测试的平均风速,并与所要求的平均风速(称为目标值)进行比较,在测试区域内两者的误差应小于10%。图4-9给出了定常风模拟时风场测量结果的实例。

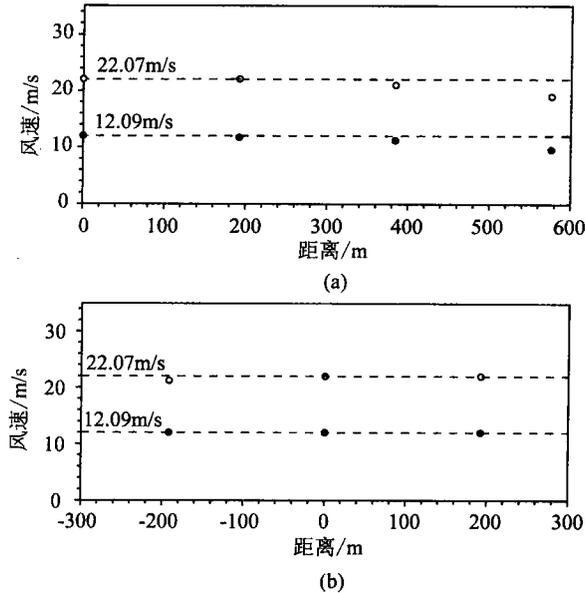


图 4-9 风场测量结果  
(a) 沿着风向; (b) 垂直风向

#### 4.4.2 非定常风的模拟

有些重大的海洋工程项目,在模型试验研究中要求模拟非定常风。所谓非定常(或称不规则)风是指风速时刻变化的随机风。试验任务书中规定了采用的风谱(API风谱或NPD风谱)、平均风速及风向。

非定常风的模拟比较复杂,需要用计算机进行自动控制,测量风速需要用高灵敏度的热线风速仪,以便测得瞬时风速进入计算机采集和分析系统。

上海交通大学海洋工程国家重点实验室编制了常用风谱的计算机控制程序以及计算机自动采集、数据处理、谱分析的专用程序。在模拟所要求的非定常风时,输入给定的风谱、平均风速控制参数和脉动控制参数,控制程序自动生成实时的时间序列信号,此数字信号经过DA转换形成序列电压脉冲信号输出到变频器。变频器根据接收到的(输入的)电压脉冲信号自动改变频率,并实时控制输出大小不同的电压信号,此电压信号再控制电机和风机的转速,最后便产生了实时不规则变化的风速。高灵敏度的风速仪将测得的数据经AD转换和计算机采集,并采用FFT数据处理和谱分析后,即可得到模拟的平均风速和风谱。如果模拟的平均风速与规定的数值(目标值)相差较大,则应调整计算机控制程序输入的平均风速控制参数。如果模拟的风谱与给定的风谱(目标谱)差异较大,则应调整计算机控制程序输入的脉动控制参数。

经过多次调整控制参数、重新造风、数据采集、分析,直至满意为止。因此不规则风的模拟一般都要经过几次调整后才能获得满意的结果。图4-10给出了上海交大海洋工程国家重点实验室模拟API风谱和NPD风谱的实例。

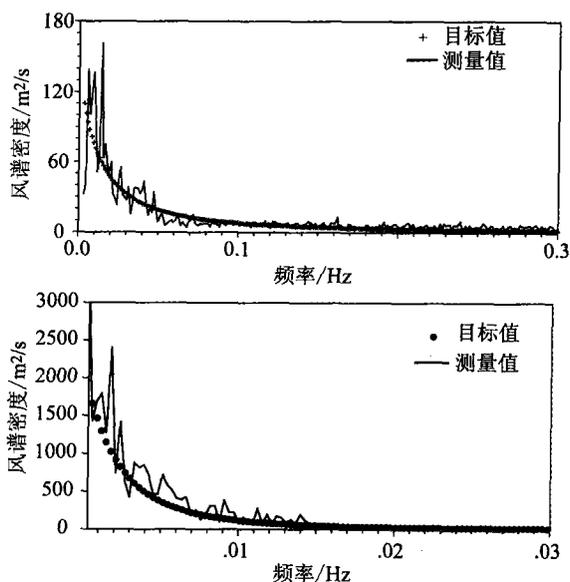


图 4-10 API 风谱(上)和 NPD 风谱(下)模拟结果

## 4.5 流的模拟

在模拟流和浪之前,应先调节好水池中的试验水深,这也是海洋环境条件模拟中的一个重要方面,只是由于问题比较简便,一般不作专门讨论。根据海洋平台实体的工作水深按缩尺计算出试验水深,调节水池中假底高度,当测得的水深达到要求便完成了试验水深的模拟。

海洋工程水池中流的模拟是由专门的造流系统来实现的。造流原理比较简单,用高压水泵将水吸入管中并均匀喷射,使水池中的水按一定方向流动,即形成流的模拟。但要形成均匀、稳定的流场,需采取整流和循环等措施。

交大海洋工程水池有整体造流系统和局部造流系统。在许多试验研究中,常采取整体造流和局部造流相结合的方法,以满足流场模拟的需要。高压喷水整体造流系统采取内循环方式;大功率水泵通过管路吸取水池中的水,经水泵加压后从安装在池墙另一端下部三根管子的喷嘴中喷出高压水流,由于每排管子在沿池宽方向均匀布置了许多喷嘴,因而喷射出的水流以及带动周围的水流比较均匀,再经过绕假底循环,从而在假底上部形成了均匀稳定的水流。流速的调节由控制水泵电机的转速来实现。整体造流系统的优点是模拟的水流比较均匀稳定,其局限性是:

- (1) 造流能力有限,能够产生的最大流速一般在 0.2m/s 左右。
- (2) 只能生成均匀流,不能模拟流速随水深按一定规律分布的流场。
- (3) 难以任意调节流向和浪向之间的夹角。

局部造流系统是通过控制潜水泵电机的转速来调节水流速度,在水池中的局部范围产生一定的流向和流速的水流。局部造流系统的优点是:

- (1) 具有产生较高流速的能力,最大流速可达 0.5m/s。
- (2) 布置比较灵活,能够任意调节流向和浪向之间的夹角。

(3) 采用多层局部造流的喷管进行分层控制,可以模拟流速随水深按一定规律分布的流场。其不足之处是:

- (1) 产生的水流速度均匀性和稳定性较差。
- (2) 受到区域的限制,往往需要进行测试调整。

在模型试验中要求模拟的流场有:

- (1) 均匀流,规定表层流速和流向。
- (2) 分层流,规定流速及随水深而变的流速分布和流向。

要求模拟的流向通常以与浪向的夹角来表示。整体造流系统的流向与浪向的夹角范围可在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内调节,局部造流的流向则可任意调节。至于要求模拟的流速 $V_{Cm}$ ,可从规定的实体平均流速 $V_{Cs}$ 按下式求得:

$$V_{Cm} = \frac{V_{Cs}}{\sqrt{\lambda}} \quad (4-6)$$

式中: $\lambda$ 为模型的缩尺比。

在流速测量方面,如果只要求平均流速,则一般采用叶轮式流速仪读取平均数值即可。如需考察流速的稳定程度和要求实时测量数据,则需要采用高灵敏度的流速仪(如多普勒流速仪)进行测量,通过AD转换可得到流速随时间的变化规律和某一指定时刻的瞬时流速。

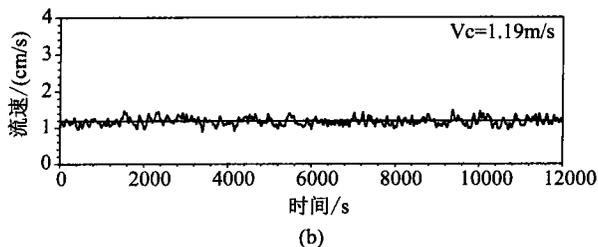
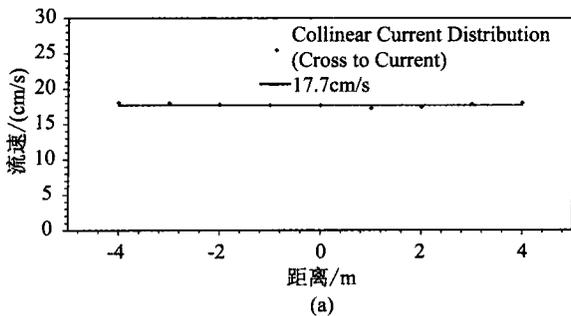
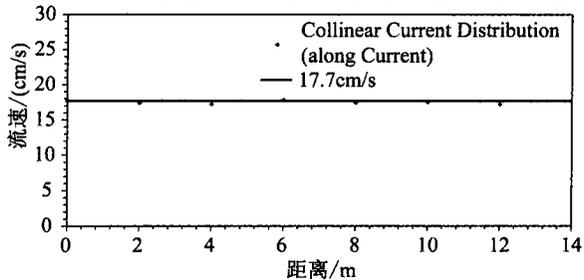


图 4-11 模拟流场的实例

(a) 流场均匀性测试结果 (b) 流场稳定性测试结果

对于均匀流的模拟,一般只需要测量模型试验区域某一指定位置处的平均流速。如果测得的平均流速大于(或小于)要求模拟的流速(目标值),则调节水泵电机的转速,使测得的平均流速满足模拟要求。测得的平均流速与目标值之间的误差一般要求小于10%。

对于重要的试验研究项目,常需要测量试验区域内流场情况,包括在同一水平面上流向(纵向)和垂流向(横向)若干点处的流速以及流速随水深的分布情况,借以反映所模拟的水流在试验区域的均匀程度。此外还需测量某一代点处规定的在试验持续时间内流速随时间的变化情况,以反映所模拟水流的时间稳定性。这种高要求的流速模拟,需要花费较多的调节、测量和分析时间才能完成。对于合乎要求的模拟流场,在均匀性和稳定性方面通常都有限定的误差指标:在试验区域内沿流向和垂流向各点所测得的平均流速与目标值的误差应小于10%(均匀性指标);在某一代表点处测得的流速

随时间的变化,其流速的均方差与平均流速的比值应小于10%。

图4-11给出了模拟流场的实例。

## 4.6 波浪的模拟

海洋工程水池都配置专门的造波机和消波装置。造波机通常能制造单方向传播的长波峰规则波和不规则波,有些特殊的造波机(多单元蛇形造波机)还能制造多方向的长峰波和短峰波。为了消除波浪到达对岸时池壁的反射作用,在造波机对面的池壁前设置专门的消波装置,使造波机在水池中产生的波浪能稳定地满足试验的要求。造波机的种类主要有柱塞式、气压式和摇板式,海洋工程水池普遍采用的都是摇板式造波机,摇板下端铰接在池体中的基座上,摇板的大部分没入水中,小部分在水面之上。在伺服电机和液压系统的驱动下,摇板作周期性的振荡运动,在水池中便产生了波浪。控制摇板的振幅和周期,可在水池中产生不同波高和不同波长的波浪。对于水池中波浪的波高和周期,可用固定于某一位置的浪高仪进行测量。

### 4.6.1 规则波的模拟

浮式海洋平台模型在规则波中进行试验的目的在于测量规则波作用下的运动及受力,并得出相应的响应幅值算子RAO。由于规则波中的试验相对简单稳定,认为得到的RAO比较正确可靠,如果在不同波长(即不同频率)的规则波中进行试验,则可以得到相当宽广波频范围内的RAO数值。根据线性叠加原理,应用所得的RAO值可以计算实物在不规则波作用下的运动及受力。实际上海洋平台模型通常都要在不规则波中进行试验,这时规则波中的试验只是为了相互比较验证,借以判断模型试验结果推算至实体的可信度。因此,海洋平台的模型一般都要在不同波频的规则波中进行试验。

模型试验研究的任务书中并不规定具体的波高数值,但要求覆盖相对宽广的波频范围。为了使试验能保持在线性范围内,造波机在水池中制造的规则波的波高与波长之比以1/35~1/50左右为宜。这是因为只有在这种情况下,频率响应函数才与波高无关,如果波高过大,则频率响应函数会随着波高的增加而减小。因此,海洋工程水池中规则波的模拟是根据上述原则和实验室造波机功能进行的。具体的思路和模拟步骤是:

(1) 根据造波机能产生规则波的频率上限(小周期的短波)和频率下限(长周期的长波),在此范围内等间距分成10~12个造波的频率。

(2) 计算各频率相应的规则波周期和波长。

(3) 根据合适的波高与波长之比,确定各频率相应的规则波的波高。

(4) 对造波机的控制系统确定相应于各频率的摇板运动周期和振幅。

(5) 在水池中对10~12个造波频率逐一模拟相应的规则波,即总共需要模拟10~12个规则波,

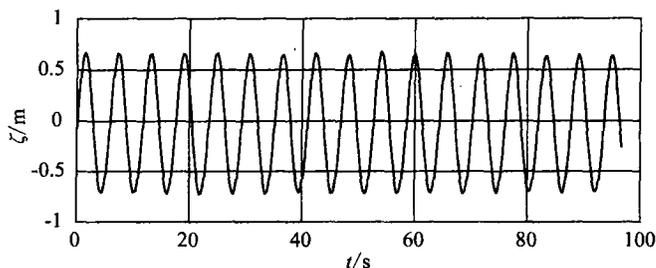


图4-12 规则波模拟实例

并以浪高仪测量所模拟规则波的时历曲线。图 4-12 给出了某一规则波模拟结果的实例。

#### 4.6.2 不规则波的模拟

浮式海洋平台模型试验的重点是在不规则波中进行的,任务书中明确规定了平台在生存状态和作业状态时的海洋环境条件。对于不规则波的模拟来说,主要给出的参数是:波谱、有义波高、谱峰周期、浪向。其中浪向是指波浪作用于海洋平台的方向,关于浪向问题将在本节末尾进行专门的讨论。

由于海流对波浪的形状有明显的影响,例如同方向的流会使波形拉长,反方向的流会使波形缩短。现时常用的波谱又是在海上有流的情况下按实测结果统计分析得到的,因此在水池中模拟不规则波浪时,必须在有流速的情况下进行。这就要求仔细研究任务书中规定的流速、流向与浪向的夹角组合等,逐一加以模拟。所以在水池中,首先要生成规定的流速和流向,然后再模拟不规则波。

实验室编制了常用的波浪谱(如 PM 谱、ISSC 谱、ITTC 谱、JONSWAP 谱等)的计算机程序,根据任务书中给定的有义波高、波谱、谱峰周期以及要求试验持续的时间在水池中进行不规则波的模拟。模拟步骤大体是:

(1) 根据给定的条件,应用计算机控制程序,产生造波机控制信号的时间序列,以此控制造波板的振幅与频率,从而在水池中产生不规则的波浪。

(2) 用浪高仪在试验持续时间内测量水池中不规则波的数据,进行谱分析后便得到模拟的波谱。如果模拟的结果与给定的目标波谱差别较大,则应修正控制信号的时间序列,重新造波。

(3) 谱的迭代修正。在不规则波的模拟过程中,第一次是以给定的目标谱  $S_T$  作为驱动谱  $S_{d1}$  生成驱动信号,由此在水池中产生的不规则波的实测波谱是  $S_{m1}$ ,如  $S_{m1}$  与给定的目标谱  $S_T$  差异较大,需对驱动谱作如下修正:

$$\frac{S_{d1}}{S_{m1}} = \frac{S_{d2}}{S_T} \text{ 或 } S_{d2} = S_T \left( \frac{S_{d1}}{S_{m1}} \right) \quad (4-7)$$

采用修正后的驱动谱  $S_{d2}$  生成驱动信号,在水池中第二次模拟不规则波浪,测量分析得到的波谱是  $S_{m2}$ 。如果  $S_{m2}$  能够满足目标谱  $S_T$  的要求,便完成了给定条件不规则波浪的模拟工作,否则要重复修正,再次在水池中模拟不规则波浪。如此反复迭代修正,直到满意为止。一般说来,仿照上述方法迭代 1~3 次便可得到满意的结果。

对于不规则波模拟结果的一般要求是:

- (1) 模拟的测量波浪谱与目标谱基本符合。
- (2) 有义波高和谱峰周期的测量值与目标值的误差小于 5%(ITTC 规定)。

图 4-13 给出了模拟测量结果与给定目标谱的比较实例。

对于不规则波模拟结果的高标准要求,除了满足上述一般要求外,还应符合下列附加要求:

- (1) 模拟波浪的二阶波浪包络谱要基本符合理论波浪包络谱。
- (2) 波峰、波谷以及波高等数值都要基本符合 Weibull 分布。
- (3) 波浪的时历基本上是线性的。

此外,还要对模拟谱和目标谱进行谱分析特征参数的比较,主要参数的误差一般不超过 5%。这些特殊要求对不规则波的试验技术和分析技术提出了更高的要求。

参数	单位	测量谱	目标谱
有义波高	m	5.24	5.20
最大波高	m	9.45	9.30
谱峰周期	s	9.17	9.10
谱峰频率	rad/s	0.69	0.69
谱峰值	m <sup>2</sup> s/rad	7.43	7.03

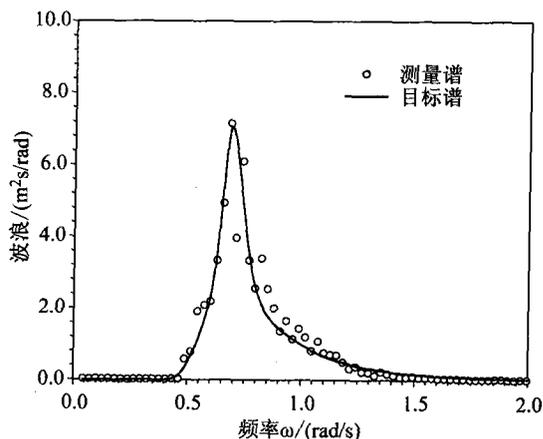


图 4-13 不规则波模拟实例

### 4.6.3 白噪声波谱的模拟

浮式海洋平台模型在不规则波中试验测得的运动和载荷等参数也是不规则的,如果把波谱和运动谱对比分析,可以得到对应频率的频率响应函数 RAO。由于海上的实际波谱是窄带谱,在高频(短波)和低频(长波)段波谱的能量值较小,引起模型运动的响应也较小,用两个较小的数据相比得到的 RAO 误差相对较大,也就是可信度较低。将模型在一系列的规则波中进行试验,由此得到各频率对应的 RAO 比较正确可靠,弥补了不规则波中试验的不足。不过,在试验池中要模拟 10~12 个规则波,然后进行 10~12 次模型试验,未免过于繁琐,于是便发展了白噪声波谱试验技术。

所谓白噪声波谱的不规则波浪,在实际海上是不存在的,其特点是在试验研究有关的频率范围内,波谱的曲线基本上平直的,因此在试验中分析得到的 RAO 在相当宽广的频率范围都比较正确可靠。这样在试验研究中,就可以用白噪声波谱不规则波浪中的一次试验代替在 10~12 个规则波中进行的模型试验,从这个意义上来说,白噪声波谱可理解为等价于 10~12 个规则波。某些重要试验研究项目,除规定在海上实际不规则波谱中进行试验外,既要求在一系列规则波中进行模型试验,还要求在白噪声波谱中进行模型试验,其目的在于互相比较印证,以获得认为可以信赖的结果。

白噪声波谱不规则波的模拟,在理论上只需给定有义波高的参数及要求的波浪频率范围即可。但由于受到造波机功能的限制,白噪声波谱的模拟在技术上有一定难度,如果给定的有义波高太大,根本不可能模拟出像样的白噪声波谱。如给定的有义波高模型数值不超过 5cm,一般说来都能模拟出比较满意的白噪声波谱。图 4-14 给出了白噪声波谱模拟的实际结果。

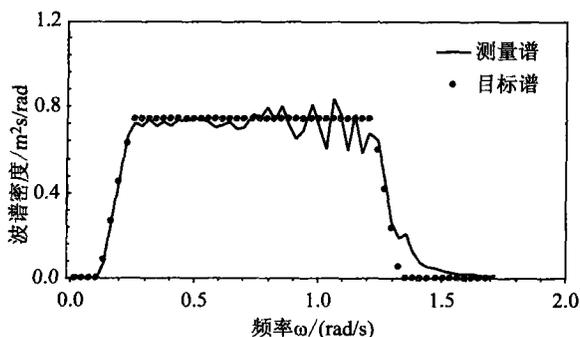


图 4-14 白噪声波谱模拟实例

#### 4.6.4 关于浪向的模拟

浮式海洋平台在海上作业会受到来自不同方向波浪的侵袭,因而在模型试验研究中,通常都规定若干不同浪向作用下平台的运动和受力情况。所谓浪向是指波浪作用于海洋平台的方向,如以 FPSO 为例并采用通常的坐标系统,则船尾对浪的方向定义为浪向  $0^\circ$ ,船首对浪的浪向为  $180^\circ$ ,船舶横对浪的浪向为  $90^\circ$ ,1/4 尾斜浪的方向为  $45^\circ$ ,1/4 首斜浪的方向为  $135^\circ$ 等。总之,浪向是描述波浪传播方向与海洋平台坐标系之间的相对角度。

在模型试验研究中,关于浪向的模拟与海洋工程水池造波机的功能有关。

(1) 对于水池中两侧都配置了造波机,且一侧配置的是多单元蛇形造波机,则该水池可以产生任意方向的波浪。只要按照任务书中规定的浪向与其他相关参数,逐个模拟所要求的波浪即可。模型在水池中布置于给定的位置后,便可按试验程序逐一在规定浪向的波浪中进行试验。

(2) 对于水池中只有一侧配置了造波机且只能产生单一方向的波浪,则只能按任务书中规定的有关参数进行波浪模拟而不考虑浪向。但模型在水池中布置于给定的位置后,只能在某一规定浪向的波浪中进行试验,试验完成后需要变动模型对波浪的方向重新布置,因而按试验程序中规定的浪向逐一布置模型在水池中的位置,以完成在不同浪向波浪中规定的试验。

上述两种方法都能实现模型在不同浪向波浪中的试验,都是海洋工程界认可的方法。前者虽不需要变换模型在水池中的位置,但要求逐一模拟规定的不同浪向的波浪,模拟波浪的工作量较大。后者虽不需模拟不同浪向的波浪,但要求逐一变换模型在水池中的位置,才能满足对不同浪向波浪中的试验,变换模型位置的工作量较大。

在海洋平台的模型试验研究中,常要求模拟风、浪、流不同方向组合的海况,这些组合一般都是以浪向为标准,故在水池中需要变换造风系统和造流系统与造波机的相对位置,以满足风、浪、流不同方向之间的组合。

# 第 5 章 测量仪器的分类、标定及模型测试校验

浮式海洋平台模型在试验中有关运动及受力等数据的测量属于非电量的电测。非电量电测仪器仪表的共同特点是由仪器本身测得的非电量数据(如位移、加速度及受力等)的变化导致电阻、电容、电压等电量的变化,两者之间的关系应始终稳定唯一,在仪器的量程范围内或呈线性关系或按照一定的曲线规律单值变化。仪器所测的数据基本上都是微电量的变化,需要通过放大器将信号放大,然后再接至记录仪表。放大器及记录仪表的反应是否灵敏,零点是否漂移等都会影响到测量数据是否真实地反映了实际情况。仪器仪表的标定要求记录仪所显示的结果与测量数据稳定唯一,而且不允许有零点漂移。各类测量仪器仪表的稳定性、可靠性及精度如何,直接影响到试验研究能否获得正确的科学结论。因此,在每个研究项目开始正式试验之前,对所有用到的各种仪器仪表都要进行标定,确保试验研究任务的顺利完成。

此外,浮式海洋平台及其系泊系统的模型在静水中的有关特性,以及在风和流单独作用下的受力特性,也会影响到模型在风、浪、流中的运动及受力情况,而且有些特性参数对试验研究的数据分析、理论与数值计算等有重要的参考作用。因此,模型正式在风、浪、流作用下的试验之前,必须进行有关测试与校验。对于重要的工程研究项目,委托单位还要求及时提供测试校验的结果,经审定同意后才能进行后续的正式试验。

本章简要介绍主要测量仪器与标定以及模型测试校验的有关内容。

## 5.1 试验测量仪器的分类

各国海洋工程水池所用的测试仪器大同小异,但由于海洋工程模型水动力试验的具体内容和需要测试的物理量非常复杂多样,所以相应测试仪器的种类也是名目繁多。如果按仪器的功能作用进行分类,主要有如下几类测量仪器。

- (1) 海洋环境条件测量仪器。包括风速仪、流速仪和浪高仪。
- (2) 六自由度运动测量仪。
- (3) 载荷测量仪器。包括拉力、压力、单分力、三分力、四分力、五分力、六分力等各类测力传感器。
- (4) 其他测量仪器。包括加速度传感器、电位器、陀螺仪、高速摄像机等。

### 5.1.1 海洋环境条件测量仪器

海洋工程水池中模拟的环境条件主要是指风、浪、流,采用的测量仪器分别称为风速仪、浪高仪和流速仪。

#### 1. 风速仪

风速仪是用于测量风速的仪器。各个海洋工程水池在试验中采用的风速仪有多种型号和类型,根据测量原理的不同,一般可分为两种:机械式叶轮风速仪、热线风速仪。前者主要用于

测量平均风速,后者可用于实时测量瞬时风速。

叶轮式风速仪全部采用机械结构,操作简单、价格低廉、携带方便,但精度较低。工作原理是:当叶轮受到风的作用产生旋转运动时,叶轮转数与风速成正比,其转数由叶轮上的齿轮传递给指针和计数器在表盘上显示出风速值。风杯是最常用的叶轮式风速仪,由风向仪、风速表和手柄三部分组成,如图 5-1 (a)所示。用风杯测量风速时,将风杯置于风场中,压下风表起动杆,指针回零,当起动扳向左转的同时,指针开始转动,计时器开始计时,当测量时间达到 1min 时,时间控制系统停止工作,风杯蜗轮空转,风表指针自动停转,读数盘上显示出风速值,根据显示风速值计算实际风速值。

热线风速仪(Hot-wire Anemometer,简称 HWA)是根据风速感应元件的冷却效应输出电讯号的测风仪器,其工作原理是:暴露在空气中的传感器(电热丝)为电桥的一个臂,当通电无风时,电桥的三个臂上的电阻与传感器臂上的电热丝电阻平衡,若传感器暴露在风场中,其温度下降导致电阻减小,需增加加热电流,使电桥重新平衡,反之亦然,加热电流的变化值就反映了风速的变化。从热线输出的电信号,经放大、补偿和数字化转换后输入计算机,可自动完成瞬时风速的测量。热线风速仪探头体积小、对流场干扰小、响应快、精度高,能测量非定常风速和低风速,但电热丝探头容易断裂,使用成本较高。

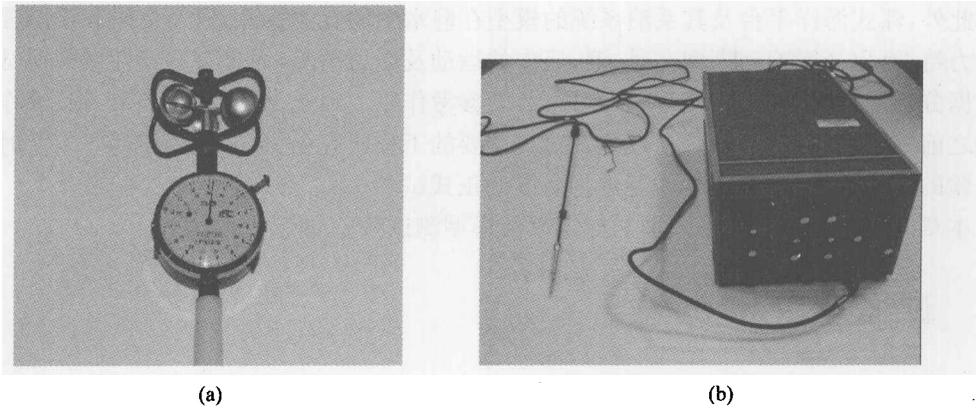


图 5-1 叶轮风速仪(风杯)和热线风速仪  
(a) 风杯;(b) 热线风速仪

## 2. 浪高仪

浪高仪是用于测试波浪的波形、波幅以及船舶与海洋结构物的波浪拍击和上浪的一种最基本的测试仪器。如果连续进行记录,可以得到某一定点处波形随时间的变化曲线,从而获得波高、波长、波频(或周期)等有关参数。浪高仪有电阻式、电容式和超声波式等多种电测型式,其原理和性能各有千秋,在海洋工程水池中应用较多的是电容式、电阻式浪高仪。

电容式浪高仪的传感器是张在一个弓架上的细金属丝,丝的表面有一层很薄的绝缘层,钽丝是以氧化膜为绝缘层,钼丝则用绝缘漆。这样的金属丝浸入水中时,与周围的水构成圆筒形电容器,其电容量的大小随着水位的升降而变化,只要测量出电容的变化,即可算出水位的变化。

电阻式浪高仪的传感器是平行镶嵌的两根不锈钢丝,钢丝的端部直接由不锈钢细管固定在有机玻璃两端。两根隔开的不锈钢丝作为探极,探极的两个导体为同一种导电材料,并且

保持平行安装,每个探极的上下大小形状应一致。通过浪高仪不锈钢丝电阻随着入水深度的变化,来达到测量波浪或水位变化的目的。图 5-2 所示为海洋工程国家重点实验室自主研发的电阻式浪高仪及其测量仪表的照片。

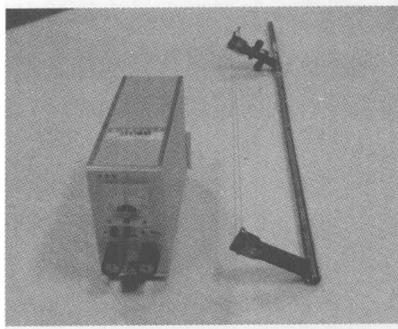


图 5-2 电阻式浪高仪及其测量仪表

### 3. 流速仪

流速仪是用于测量水流速度和方向的仪器,目的在于掌握水流特性,研究其在时间上的变化和空间上的分布,分析相关规律。流速仪种类繁多,按其探头的工作原理,基本可分为机械式、电磁式和声学式三种类型。

在海洋工程水池中应用较多的是机械式叶轮流速仪和声学多普勒流速仪,前者主要用于测量平均的水流速度,后者用于实时测量瞬时的水流速度和方向。

机械式叶轮流速仪的原理是根据叶轮被水流推动的转数,测出流速。

声学多普勒流速仪的原理是利用声波在流动海水中悬浮物质所产生的多普勒效应测量流速和流向。其声学传感器感应灵敏、反应快、量程宽,可测弱流,也可测强流,可测平均流速,也可测瞬时流速,因此目前应用较广。声学多普勒流速仪包括点式流速仪和剖面流速仪两种,顾名思义,前者用于测量单个空间位置处的流速和流向,后者则同时可以测得一个剖面的流速和流向数据,特别适合于深水流的测量。

图 5-3 所示是海洋工程水池流速仪的照片。

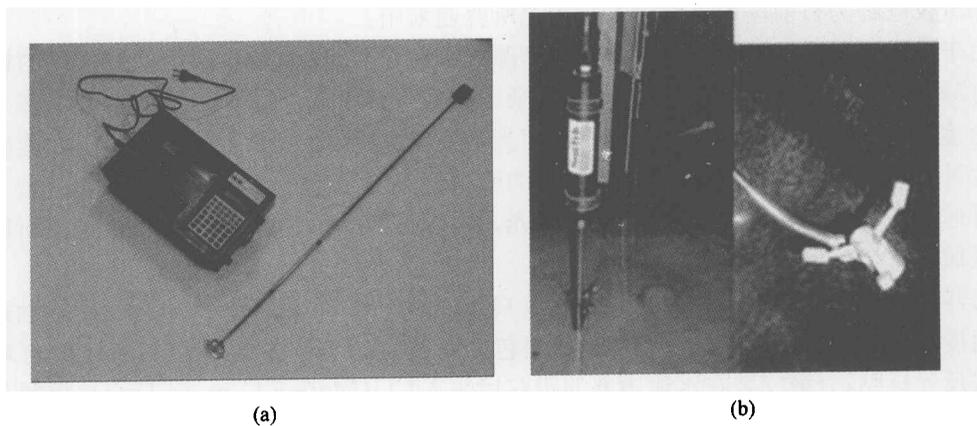


图 5-3 流速仪

(a) 叶轮流速仪;(b) 多普勒流速仪

## 5.1.2 六自由度运动测量仪

用于测量船舶与浮式海洋平台模型的六自由度运动,主要有机械式(接触式)运动测量仪、加速度运动测量仪、非接触式光学运动测量仪等多种类型。

早期机械式运动测量仪由电位器及陀螺仪等组合而成,六个自由度的运动分开测量。由于仪器本身的惯性和摩擦等作用,致使测量误差大,响应慢,而且由于采用接触式的机械装置

连接,会影响到模型的运动。

加速度运动测量仪是应用加速度仪测得模型运动的加速度,通过对加速度进行二次积分,求得模型的空间位置和运动时历。由于随时间积分时将产生累积误差,测试时间越长,累积误差也越大。

非接触式光学运动测量仪应用位置测量仪(摄像机)跟踪测量固定在模型上的至少三个红外线发光源(或称灯球),得到这些发光源随模型运动的三维空间坐标数据,然后通过软件的信号处理与计算分析,得到模型的六个自由度运动参数(含三个线运动和三个角运动)。模型参考点  $G$  与模型上任一相对固定点  $R$  之间的坐标关系式如下:

$$\begin{cases} x = x_G + c_{\xi x}\xi + c_{\eta x}\eta + c_{\zeta x}\zeta \\ y = y_G + c_{\xi y}\xi + c_{\eta y}\eta + c_{\zeta y}\zeta \\ z = z_G + c_{\xi z}\xi + c_{\eta z}\eta + c_{\zeta z}\zeta \end{cases} \quad (5-1)$$

式中:  $(x_G, y_G, z_G)$ 、 $(x, y, z)$  分别为  $G$  点、 $R$  点的空间运动坐标;  $(\xi, \eta, \zeta)$  为  $R$  点在模型随体坐标系上的相对坐标。九个方向余弦与模型运动的三个欧拉角(即三个角运动)相关。根据试验时至少三个光点的相对位置坐标和测量得到的至少九个光学坐标,即可由上式计算得到模型参考点  $G$  处的六个自由度运动。

这种运动测量仪由于采用非接触式测量和红外光源跟踪方式,所以可有效避免接触干扰和环境干扰,从而减少误差;而且位置测量仪具有较高的位置解析度与快速响应能力,测量结果精度较高,线运动可达 1mm,角运动可达  $0.1^\circ$ ;如果同时采用多个镜头跟踪,在多个模型上都布置红外线发光源,即可同时实时跟踪测量多个模型的六自由度运动。因此,非接触式光学运动测量仪已经为目前国内外海洋工程水池所普遍采用。

由于运动测量采用光学跟踪和识别发光源的方法,所以试验中对于运动测量仪的镜头和发光灯球安装布置的要求比较高,也比较复杂。特别是采用多个跟踪镜头、同时测量多个物体六自由度运动的时候,安装布置工作具有相当难度,有时甚至需要重复修正多次才能满足要求。这种安装布置没有固定统一的方式,总的原则是要求在整个试验过程中,各个模型上所安装的灯球不能相互干扰,更不能相互重叠遮光,不允许有任何一个灯球超出跟踪镜头所覆盖的测量区域。

海洋工程国家重点实验室采用的是瑞典 Qualisys 公司开发的 MarineTrak 非接触式光学六自由度运动测量系统。该系统的组成主要包括:安装在模型上的主动式红外发光灯球或者被动式反光标贴,分散安装在水池边上的跟踪镜头 MCU(Motion Capture Unit),控制与采集计算机,如图 5-4 所示。

MarineTrak 系统除了具有非接触式光学运动测量系统测量精度高等的诸多优点之外,还具有其他一些显著的特点,包括:

(1) 测量范围广。可根据实际测量的需要采用多个跟踪镜头进行合理的组合布置,以扩大测量范围。采用 2 个跟踪镜头,距离目标模型 20m 时,测量范围可达  $4\text{m} \times 4\text{m}$ ;如果采用两组共 10 个镜头时,测量范围可达  $36\text{m} \times 22\text{m}$ 。

(2) 可同时跟踪测量多个模型物体的六自由度运动。如果能够合理地布置发光光源,避免相互干扰,据称最多可以同时测量多达 10 个物体的运动。交大水池曾经成功地同时测量了 3 个物体的运动。

(3) 发光灯球重量轻,无需岸上供电,易于布置。安装在模型上的主动式红外发光灯球及

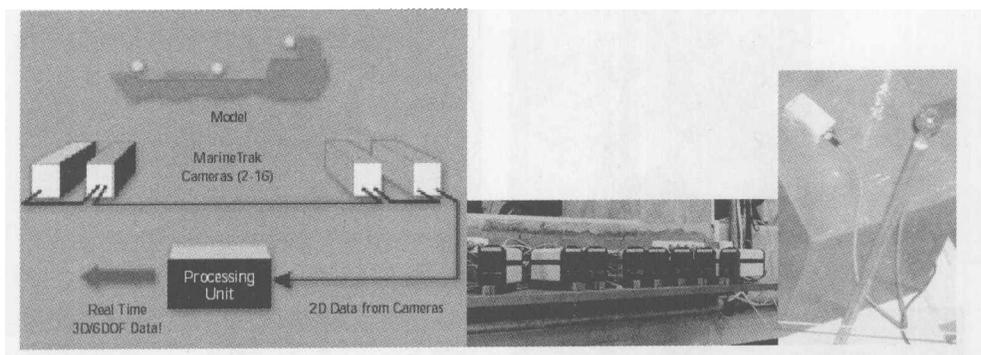


图 5-4 MarineTrak 光学六自由度运动测量系统示意图

相配套的 9V 干电池重量很小,总重量仅为 150g。对于很小的模型(如浮筒等),还可采用被动式反光标贴,镜头发出红外光脉冲,经反光标贴反射后再由镜头接受并处理,从而测得六自由度的运动。交大水池采用这种测试技术,成功地测量了直径为 25cm、总重仅 2.5kg 浮筒模型的六自由度运动。

### 5.1.3 测力传感器

浮式海洋平台在风、浪、流作用下受到的流体动力载荷种类繁多,因而在模型试验中需要用各类测力传感器测量相应的载荷。

测量锚链、系泊缆和立管所受张力的拉力传感器,测量靠泊力、波浪砰击力的压力传感器,测量支撑或连接杆件所受轴向拉力和压力的拉压传感器,这些都是相对简单的单向测力传感器。

与六自由度运动相对应,船舶与海洋平台模型在风、浪、流作用下会受到六个方向的力和力矩的作用,包括纵向、横向和垂向的三个分力和三个分力矩。这些力和力矩有时也存在于模型与模型之间、模型局部结构之间的连接处。对于这些力和力矩的测量,视需要可用三分力、四分力、五分力或六分力等不同类型比较复杂的测力传感器。如果要求同时测量所有这些六个方向的受力及力矩,例如分节船模试验中的波浪载荷测量,就需要采用复杂的六分力传感器。如果其中某一个分力或分力矩不需要测量,例如转塔式系泊系统试验中的转塔处系泊力,垂向力矩始终为零而不需要测量,那么采用五分力传感器也可以。如果只需要测量四个分力和力矩,例如船舶和海洋平台的风、流作用力试验中,只需要测量纵向力和横向力、首摇力矩和倾覆力矩,那么采用四分力传感器也可以。如果只需要测量三个分力和力矩,例如软刚臂系泊系统试验中的吊杆与 FPSO 支撑结构的系泊力,三个方向的转动都是自由的,不存在作用力矩,那么采用三分力传感器就可以进行测量。

现时用于测量模型受力的传感器都是根据电阻应变仪的基本原理制作而成,在测力元件上贴有电阻应变片,测力元件受力后会使得电阻丝拉长或缩短,改变了电阻的性能,电阻数值的变化信号通过放大器输入记录仪器,根据记录仪数据与受力的关系便可测得受力的大小。

图 5-5 给出了几种常用测力传感器的照片。

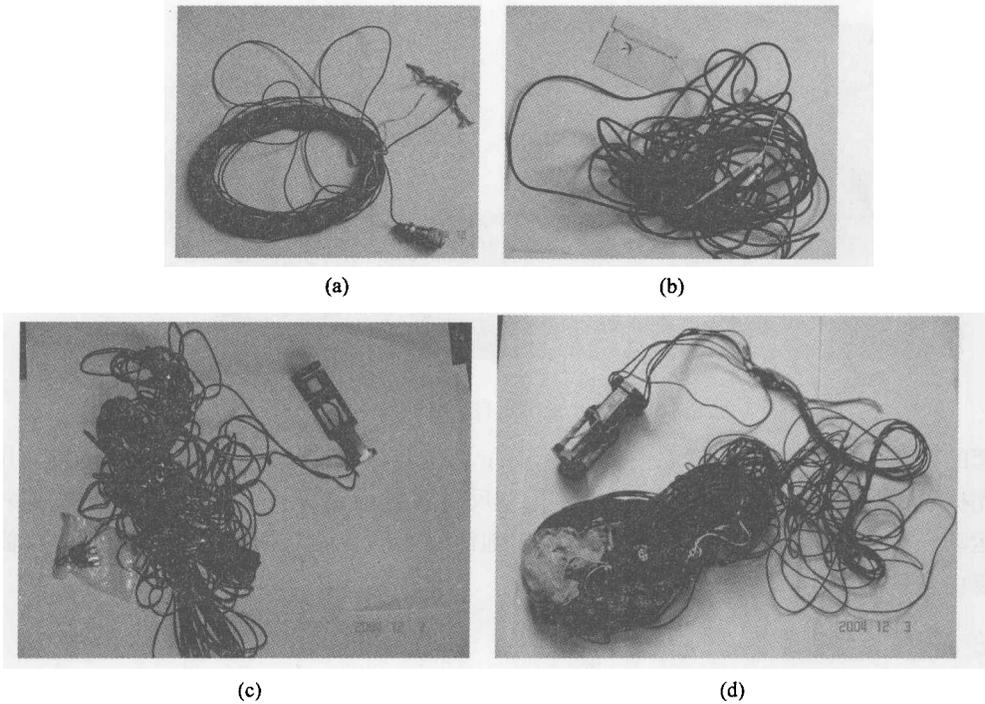


图 5-5 测力传感器

(a) 拉力传感器; (b) 压力传感器; (c) 三分力传感器; (d) 六分力传感器

#### 5.1.4 其他测量仪器

上述环境参数测量仪器、六自由度运动测量仪、测力传感器是海洋工程水动力模型试验中最常用的主要测量仪器。这些仪器的先进与否、水平高低,直接体现了海洋工程水池的测试能力。除此之外,在一些特殊类型的模型试验内容中,其他一些测量仪器有时也往往被采用。

用于测量模型物体运动加速度的仪器称为加速度传感器,通常包括线加速度传感器和角加速度传感器。运动加速度往往是衡量船舶与海洋平台上人和设备在作业时的适应能力的重要指标参数,因此在风、浪、流模型试验中,特别是对于作业海况的试验,往往需要在船舶或浮式海洋平台模型甲板上的某些重要部位,如生活舱室、火炬塔、油气分离设备等位置,安装数个加速度传感器,直接测量该处各个方向运动的加速度。

对于模型物体运动或相对运动的测量,除光学六自由度运动测量仪外,有时根据试验需要,还使用比较简便的仪器直接测量得到有关的运动参数,这些仪器包括线位移传感器、陀螺仪、角度电位器等。采用线位移传感器可以测量单个方向的线位移,例如超大型浮体沿长度方向的垂向线位移或二个构件连接处的相对线位移。采用陀螺仪可以测量横摇和纵摇运动,例如船模横摇试验中的运动测量,只需要测量横摇和纵摇。采用角度电位器可以测量角度变化或角运动,例如自航模试验中的舵角测量,FPSO 软刚臂系泊系统试验中的软钢臂横摇、纵摇和首摇角运动的测量。

高速摄像机有时也在试验中得到应用,例如在甲板上浪试验中用于观测上浪水的运动演化情况,在柔性构件涡激振动试验中用于观测柔性构件的振动情况。

数码相机、数码摄像机在试验中也是必须的,用于拍摄记录整个试验过程中的模型情况、模型在风、浪、流作用下的运动情况。

图 5-6 给出了线位移传感器与加速度传感器的照片。

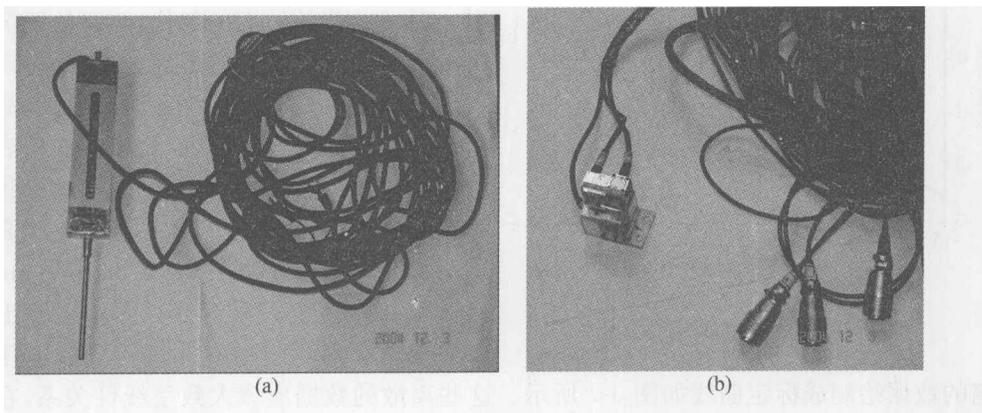


图 5-6 位移传感器与加速度传感器

(a) 位移传感器; (b) 加速度传感器

## 5.2 试验测量仪器的标定

试验测量仪器的标定是海洋工程水动力模型试验过程中的重要环节,目的在于确定仪器模拟电信号和数据采集数字信号之间的比例关系(或称系数)。这种关系既与仪器本身的特性有关,也与实际模型试验中的多种具体因素有关,例如仪器的连接、安装、布置、环境温度和湿度、信号放大器的参数设置等。因此,原则上,试验中用到的所有测量仪器都必须在使用之前进行认真细致的标定工作,以确定所需要的系数。

### 5.2.1 风速仪、流速仪和浪高仪的标定

叶轮风速仪的标定主要是确定风速与叶轮转速之间的关系。这种机械式风速仪在出厂前都已在风洞中经过仔细的标定,在读数表盘上刻有转速与风速的对应关系。由于这类仪器性能比较稳定,并非每个项目试验之前都要标定,一般每半年标定一次即可。热线风速仪在出厂前也都在风洞中进行过标定并给出风速与读数之间的关系,但每次项目试验之前都要进行标定。为了简便起见,常用叶轮风速仪和热线风速仪并排安装于风场中的某一指定位置,同时记录风速与仪器读数之间的关系,起到相互校核和对比的作用,一般以叶轮风速仪的数据为标准检验热线风速仪的结果。

流速仪的标定主要是确定流速与叶轮转速或声波多普勒效应之间的关系。机械式叶轮流速仪和声学多普勒流速仪在出厂以前都已在拖曳水池或空泡水筒中经过仔细的标定,而且标定系数比较稳定,不需要在每个项目试验之前都进行标定,一般每半年标定一次即可。标定时,将流速仪安装在行进速度稳定的水池拖车上,将测量流速的方向与拖车行进的方向保持一致,然后以若干个不同的速度开动拖车,等速度稳定后,记录流速仪读数与拖车速度之间的关系。最后,根据记录的关系曲线,便可校验或重新确定流速仪的转换系数。

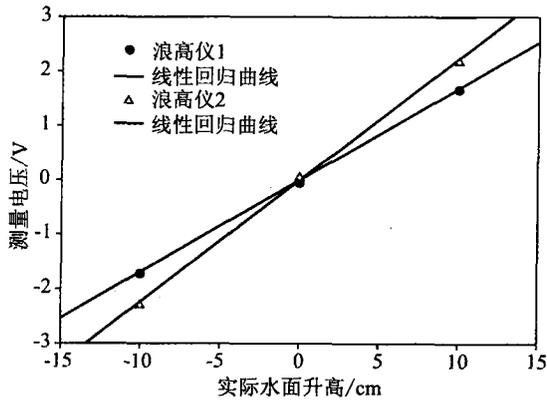


图 5-7 浪高仪标定曲线

电阻式浪高仪的标定主要是确定波高与模拟信号电压之间的关系。浪高仪的静态标定在静水中进行,采用升降浪高仪的方法间接模拟波面的起伏,波高仪下沉的标定相应于测量波面的抬高,上升的标定相应于测量波面的下陷。标定时,先将浪高仪的中间部位置于静水面处,调整二次仪表的读数使之大致处于零位,将采集系统采集得到的电压数据作为零位,然后依次将浪高仪下沉或上升至设定的距离(如 5cm, 10cm, ……),由采集系统采集得到二次仪表输出的电压数据。最后将所有测试得到的电压和升降

距离的数据绘制成标定曲线如图 5-7 所示。这些离散的数据应该大致呈线性关系,在进行线性回归后,即可得到浪高仪电压与波高之间的标定系数,该系数将在后续各项试验的数据采集中使用。如果标定发现测量数据的线性度较差,不符合要求,则需要寻找原因,重新标定,甚至更换浪高仪或二次仪表。

### 5.2.2 MarineTrak 光学六自由度运动测量系统的标定

非接触式光学六自由度运动测量系统是价格相当昂贵的精密仪器,在研制过程中都经过仔细校验,并编制有基于 Windows 操作系统的可视化、交互式的数据采集、处理与分析软件,与跟踪镜头和发光灯球等硬件设备配套,供使用者对目标物体的二维坐标、三维坐标以及六自由度运动进行实时的跟踪测量。

在正式进行测量之前,由于多个跟踪镜头的组合需要根据实际所需测量区域的大小、周围可供安装的具体场地条件等进行恰当的安装布置,所以必须在软件中设置关于这些镜头的实际安装位置和方向等的参数,而且必须根据实际测量的需要设置运动测量的总体坐标系(大地坐标系)。这些信息的设置工作都是在对测量系统进行标定的过程中完成的。因此,在每次试验之前,都必须进行光学运动测量系统的标定。

另外,跟踪镜头非常精密、非常敏感,只要稍加触碰,或者因放置时间过长受到大地振动的影响,使得测量误差增大,就都必须重新进行标定,然后才能进行测量。因此,在完成标定后,任何人不得随意触碰镜头,否则前功尽弃,必须重新进行标定。

对于 MarineTrak 光学运动测量系统,标定的方法有 3 种:

- (1) 架杆标定(Wand calibration)。
- (2) 框架标定(Frame calibration)。
- (3) 固定镜头标定(Fixed camera calibration)。

采用架杆标定方法,需要用到标定专用的 L 型架和 T 型架。L 型架的 2 个边相互垂直,交点上有一个发光灯球,代表全局坐标系的原点  $O$ ;长边上另有 2 个发光灯球,构成全局坐标系的  $x$  轴;短边上另有 1 个发光灯球,构成全局坐标系的  $y$  轴。T 型架上有 2 个发光灯球,相互之间距离恒定。标定时,将 L 型架布置在测量区域所需要设定的全局坐标系  $xy$  平面上,长边和短边分别与对应的坐标轴平行,并低于跟踪镜头的平面高度。调整跟踪镜头的位置和方

向,使得所覆盖的测量区域符合要求,并能看到 L 型架上的所有灯球。将控制计算机上的软件设定为架杆标定模式,设定或输入 L 型架和 T 型架的坐标或距离参数。标定开始后,手持 T 型架在 L 型架的上方缓慢移动,并持续一段时间(如 30s),移动范围尽可能地覆盖所能达到的测量区域,直到标定结束。如果软件计算出的标定残差符合要求,则标定结束,否则要寻找原因,重复进行,直到标定残差满足要求。

采用框架标定方法,需要用到标定专用的立体框架。在框架上不对称地固定至少 5 个发光灯球,而且这些灯球不能在同一个平面内。标定时,将框架布置在测量区域内,通过人工测量等其他方式,获得框架上所有灯球在所需要设定的全局坐标系中的三维坐标。调整跟踪镜头的位置和方向,使得所覆盖的测量区域符合要求,并能看到框架上的所有灯球。将控制计算机上的软件设定为框架标定模式,输入框架上所有灯球的三维坐标参数。开始标定并持续一段时间(如 5s),结束标定。如果软件计算出的标定残差符合要求,则标定结束,否则要寻找原因或更改坐标参数,重复进行,直到标定残差满足要求。

采用固定镜头标定方法,需要用到标定专用的参考灯球(Reference marker)。调整跟踪镜头的位置和方向,使得所覆盖的测量区域符合要求。在测量区域内布置足够数量的参考灯球,使得每一个参考灯球都能同时被至少两个镜头观察到,而且每一个镜头又同时能观察到至少两个参考灯球。通过人工测量等其他方式,获得所有用到的跟踪镜头、参考灯球在所需要设定的全局坐标系中的三维坐标。将控制计算机上的软件设定为固定镜头标定模式,输入所有镜头和参考灯球的三维坐标参数。开始标定并持续一段时间(如 5s),结束标定。如果软件计算出的标定残差符合要求,则标定结束,否则要寻找原因或更改坐标参数,重复进行,直到标定残差满足要求。

在上述三种标定方法中,架杆标定方法最为简单方便,标定结果也最为准确可靠,因此被经常采用。后两种方法由于需要通过其他方式测量得到所有灯球或镜头的三维坐标参数,比较麻烦,而且不容易控制测量精度,所有应用较少。但如果测量区域特别大,例如需要覆盖整个水池,那么固定镜头标定方法将具有独特优势,在可以精确地测量得到所有镜头和参考灯球三维坐标的前提下,将是最好的一种标定方法。

### 5.2.3 测力传感器的标定

测力传感器的响应特性与实际试验时的接线、信号放大器参数设置、环境等都有直接关系。因此,在每次试验之前,都必须对所使用的每一个测力传感器进行仔细的标定,以确定输出电压和实际受力的比例关系(或称系数)。

如前所述,测力传感器种类繁多,其标定方法也各不相同。归纳起来,可分为两种:

- (1) 单向测力传感器的标定。
- (2) 多分力传感器的标定。

单向测力传感器(拉力、压力和拉压传感器)的静态标定比较简单,用挂砝码的方法可以确定拉力(或压力)与输出电压数据的关系。以拉力传感器为例进行说明。标定时,将拉力传感器一端固定后自由悬垂,调整信号放大器的读数使之大致处于零位,将采集系统采集得到的电压数据作为零位。然后依次在拉力传感器下挂上 1kg、2kg、3kg 砝码,待稳定后,采集系统依次采集电压数据。最后将所有测试得到的电压和砝码重量(受力)的数据绘制成标定曲线,如图 5-8 所示。这些离散的数据应该大致呈线性关系,在进行线性回归后,即可得到拉力传感器的电压与受力之间的标定系数,该系数将在后续各项试验的数据采集中使用。如果标定发现

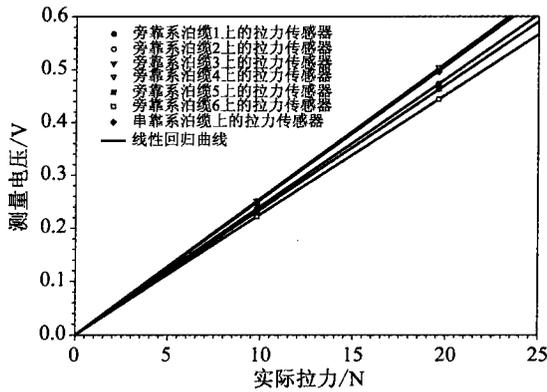


图 5-8 拉力传感器的标定曲线

传感器是比较昂贵的精密仪器,制造商对测力元件的合理设计和精细加工,基本上消除了各分力之间的相互干扰,并在出厂时已对小量的干扰经过标定处理。因此使用单位在试验前对多分力传感器的静态标定相对比较简单,只要用挂砝码的方法对每一个分力分别进行静态标定即可。具体标定过程大体上与拉力传感器的标定类似,标定过程中应严格保持砝码作用力的方向与所标定的分力方向一致。在静态标定中还可顺便检查是否存在相互干扰,例如在标定某一方向的受力时,其他各分力的记录是否为零。一般说来,现时使用的多分力传感器在静态标定中,不会出现相互干扰现象。同样地,在标定结束后将所有测试得到的电压和砝码重量(受力)的数据绘制成标定曲线,而且应该大致呈线性关系,在进行线性回归后,得到电压与受力之间的标定系数。如果标定发现测量数据的线性度较差,不符合要求,则需要寻找原因,重新标定,甚至更换多分力传感器或信号放大器。作为示例,图 5-9 给出了三分力传感器的标定曲线。

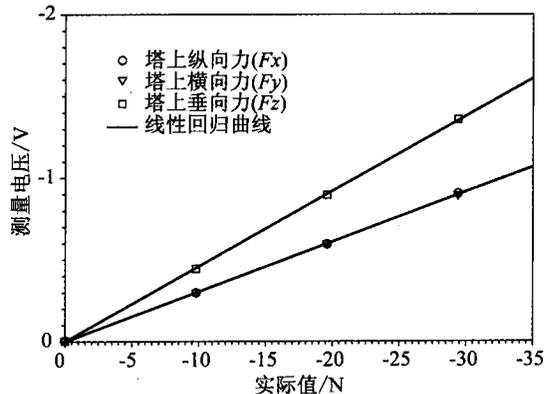


图 5-9 三分力传感器的标定曲线

最后,顺便指出在各类测量仪器静态标定中需要特别注意的两点:

(1) 静态标定应从零点开始分若干点直至仪器的满量程为止,设定各标定量(力或力矩等)并通过采集系统采集得到相应的数据;为此反复 1~2 次,便可检查测量仪器是否有零漂现象和标定量与记录数据是否确定有稳定唯一的关系。如果出现问题则应查找原因予以纠正。

(2) 将各标定量与相应记录电压数据的关系(比例系数)储存在数据自动采集系统中,以便在后续模型试验中直接调用。

### 5.3 模型在静水中浮态的观测

将重量、重心位置及惯量调节模拟完成的模型吊放到水池中,待池中的水平静后,仔细观

测量数据的线性度较差,不符合要求,则需要寻找原因,重新标定,甚至更换测力传感器或信号放大器。

多分力(三分力、四分力、五分力和六分力)传感器的标定比较复杂,各分力之间有相互干扰,例如标定  $x$  方向的受力时,会影响  $y$  方向和  $z$  方向测力元件的变形而使记录的数据上有  $y$  方向和  $z$  方向的读数,为此需要处理相互干扰的数据。对于六分力传感器而言,标定一个方向的受力时,会干扰其他二个方向的受力和三个方向的力矩记录,这就使静态标定相对困难。由于多分力

传感器是比较昂贵的精密仪器,制造商对测力元件的合理设计和精细加工,基本上消除了各分力之间的相互干扰,并在出厂时已对小量的干扰经过标定处理。因此使用单位在试验前对多分力传感器的静态标定相对比较简单,只要用挂砝码的方法对每一个分力分别进行静态标定即可。具体标定过程大体上与拉力传感器的标定类似,标定过程中应严格保持砝码作用力的方向与所标定的分力方向一致。在静态标定中还可顺便检查是否存在相互干扰,例如在标定某一方向的受力时,其他各分力的记录是否为零。一般说来,现时使用的多分力传感器在静态

标定中,不会出现相互干扰现象。同样地,在标定结束后将所有测试得到的电压和砝码重量(受力)的数据绘制成标定曲线,而且应该大致呈线性关系,在进行线性回归后,得到电压与受力之间的标定系数。如果标定发现测量数据的线性度较差,不符合要求,则需要寻找原因,重新标定,甚至更换多分力传感器或信号放大器。作为示例,图 5-9 给出了三分力传感器的标定曲线。

最后,顺便指出在各类测量仪器静态标定中需要特别注意的两点:

(1) 静态标定应从零点开始分若干点直至仪器的满量程为止,设定各标定量(力或力矩等)并通过采集系统采集得到相应的数据;为此反复 1~2 次,便可检查测量仪器是否有零漂现象和标定量与记录数据是否确定有稳定唯一的关系。如果出现问题则应查找原因予以纠正。

(2) 将各标定量与相应记录电压数据的关系(比例系数)储存在数据自动采集系统中,以便在后续模型试验中直接调用。

### 5.3 模型在静水中浮态的观测

将重量、重心位置及惯量调节模拟完成的模型吊放到水池中,待池中的水平静后,仔细观

测模型在静水中的平衡状态(即浮态),通常可以用目测或探针进行测量。主要是检查模型左右两舷外表面在首、尾及中部所刻的水线标记是否与静水面一致。如果首、尾的吃水标记与静水面有一定差异,表明调节重心纵向位置有误差而使模型有微小的纵倾,如果左右舷的吃水标记与静水面有一定差异,表明调节的重心位置不在中纵剖面内而使模型有微小的横倾。一般情况下,经过重量、重心位置仔细调节后的模型不会出现上述现象,除非模型在搬运和吊放过程中压铁的位置发生了变动,但经认真检查后不难纠正。

静水中浮态观测的重点是检验模型制作的正确程度是否达到国际船模试验池会议(ITTC)所规定的误差标准。模型在试验吃水状态时的排水量是按照设计图(海洋平台)或者型线图 and 型值表(船舶)计算得到,其正确的数值为 $\Delta_m$ ,模型制作完工后在重量调节时设定的重量也是 $\Delta_m$ ,如果模型制造无误差,则水池中的静水面必然与模型左右两舷所刻划的吃水标记相吻合。如果两者有差异,则表明模型制作加工有误差。通常模型试验研究中规定,排水量必须满足相似的要求,而吃水允许有一定的误差,ITTC的规定是水池中静水面与模型刻划的吃水标记之间的误差应小于 $\pm 1\text{mm}$ 。如果吃水误差超过 $\pm 1\text{mm}$ ,则应仔细查找原因并设法补救。

#### 5.4 静水中浮体模型的单自由度运动衰减试验

浮式海洋平台的六个自由度运动中,垂直面内的三个运动(横摇、纵摇和垂荡)有静恢复力或力矩,在外力作用下偏离了平衡位置,但当外力停止作用后,依靠静恢复力或力矩的作用可以恢复到原来的平衡位置。因此要对模型在静水中分别进行自由横摇、纵摇和垂荡的衰减试验,目的在于获得这些运动的固有周期、阻尼系数等重要参数,验证模型制作以及重心和惯量模拟的准确性。

下面以静水自由横摇衰减试验为例,进行较为仔细的讨论。

模型在静水中处于平衡状态时,使其横倾至某一角度 $\phi_{A0}$ ,然后突然放开,模型便会在静水中绕平衡位置做自由横摇衰减运动,直至最后静止并稳定于原来的平衡位置。应用运动测量仪器,可以实时测量并记录模型在整个横摇运动过程中的时历曲线,通过数据分析可得出运动的固有周期和阻尼系数等重要参数。

浮体(设为船模)在静水中自由横摇的运动方程为

$$I'_{xx} \ddot{\phi} + 2N \dot{\phi} + Dh_T \phi = 0 \quad (5-2)$$

式中: $\ddot{\phi}$ 、 $\dot{\phi}$ 和 $\phi$ 分别为横摇的角加速度、角速度和角位移;

$I'_{xx}$ 为浮体的横摇总惯性矩(包括附加惯性矩);

$N$ 为横摇阻尼力矩系数;

$D$ 为排水重量;

$h_T$ 为横稳性高。

令 $2\nu = \frac{2N}{I'_{xx}}$ , $\omega_0^2 = \frac{Dh_T}{I'_{xx}}$ ,则运动方程式(5-2)可写为:

$$\ddot{\phi} + 2\nu \dot{\phi} + \omega_0^2 \phi = 0 \quad (5-3)$$

其通解为:

$$\phi = e^{-\nu t} [C_1 \cos \omega'_0 t + C_2 \sin \omega'_0 t] \quad (5-4)$$

式中： $\omega'_\phi = \sqrt{\omega_\phi^2 - \nu^2}$ ；积分常数  $C_1, C_2$  可由初始条件决定。假定在  $t=0$  时的初始条件为： $\phi = \phi_{A0}, \dot{\phi} = 0$ ，则  $C_1 = \phi_{A0}, C_2 = \frac{\phi_{A0} D}{\omega_\phi}$ 。因此，式(5-4)可写为：

$$\phi = \phi_{A0} e^{-\nu t} \left[ \cos \omega'_\phi t + \frac{\nu}{\omega'_\phi} \sin \omega'_\phi t \right] \quad (5-5)$$

在上述各式中： $\nu = \frac{N}{I'_{xx}}$  为横摇衰减系数； $\omega_\phi = \sqrt{\frac{Dh_T}{I'_{xx}}}$  为横摇的固有频率； $\omega'_\phi$  为计及水的阻尼后的横摇固有频率，由于  $\nu$  的数值很小， $\omega'_\phi$  与横摇的固有频率  $\omega_\phi$  十分接近，可以认为  $\omega'_\phi \approx \omega_\phi$ 。

令  $\mu = \frac{\nu}{\omega_\phi} \approx \frac{\nu}{\omega'_\phi}$ ， $\mu$  称为横摇的无因次衰减系数，或无因次阻尼系数。

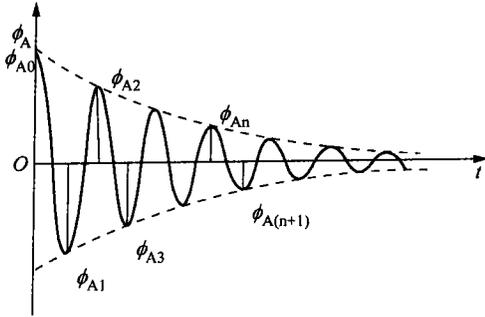


图 5-10 静水中的自由横摇衰减曲线

上述推导结果，是分析自由横摇衰减试验的理论依据。通过模型在静水中的自由横摇衰减试验，测量并记录得到模型的横摇衰减时历曲线，如图 5-10 所示。从图中横摇衰减曲线可以看出，横摇幅值是按指数规律随时间而衰减，相邻两个横摇峰值（如  $\phi_{A2}, \phi_{A4}$ ）或谷值（为  $\phi_{A1}, \phi_{A3}$ ）之间的时间间隔即为横摇的固有周期  $T_\phi$ 。

另外，从时间  $t_1$  到  $t_2 = t_1 + \frac{T_\phi}{2}$  的半个周期时间间隔内，横摇幅值绝对值的变化为：

$$\left| \frac{\phi_{A2}}{\phi_{A1}} \right| = e^{-\nu \frac{T_\phi}{2}} = e^{-\mu \pi} \quad (5-6)$$

可得无因次衰减系数的表达式为：

$$\mu = \frac{1}{\pi} \ln \left| \frac{\phi_{A1}}{\phi_{A2}} \right| \quad (5-7)$$

推广的普通表达式为：

$$\mu = \frac{1}{\pi} \ln \left| \frac{\phi_{An}}{\phi_{A(n+1)}} \right|, \text{ 其中 } \phi_{An} > \phi_{A(n+1)} \quad (5-8)$$

式中： $\phi_{An}$  和  $\phi_{A(n+1)}$  分别为第  $n$  和第  $n+1$  个峰值或谷值。由此可知，根据模型在静水中的自由横摇衰减试验测量得到的衰减曲线，便可分析得到横摇的固有周期  $T_\phi$  和无因次阻尼系数  $\mu$ 。作为示例，图 5-11 给出了某次模型试验中的静水横摇衰减曲线。

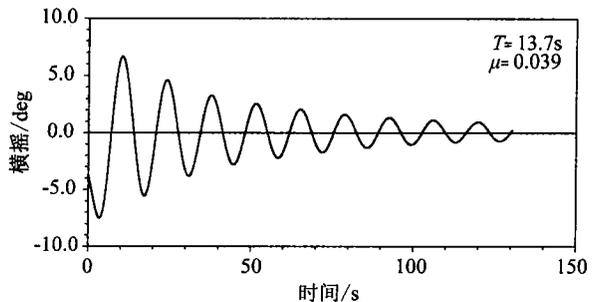


图 5-11 静水横摇衰减曲线

上面所讨论的自由横摇问题，其理论依据和分析方法同样适用于其他形式的单自由度振荡运动，如纵摇和垂荡。对于模型在静水中的自由纵摇衰减试验，一般在模型首部使之纵倾某一角度后突然放开，便可测量并记录得到自由纵摇衰减的时历曲线。至于垂荡试验，则应在模型重心位置的上方，将模型下压使之平行下沉至某一距离后突然放开，然后测

量并记录自由垂荡衰减的时历曲线。其相应的固有周期和无因次阻尼系数的确定方法与自由横摇衰减试验相类似,不再重复介绍。作为示例,图 5-12 分别给出了静水中自由纵摇和垂荡衰减试验的时历曲线。

在试验任务书中,试验委托方往往会根据数值计算结果给出进行模型试验的船舶或海洋平台的固有周期理论值。通过静水衰减试验,获得实际固有周期的测量值后,应与相应的理论值进行对比,以达到验证的目的。如测量得到的固有周期与所要求的理论值一致,则可继续进行试验,如不符合,则需要寻找原因,甚至重新调整重心、惯量等参数,最终达到正确模拟的目的。试验结束后,需要将静水衰减试验的结果,包括固有周期、无因次阻尼系数、衰减时历曲线,以及与理论值的对比情况,写入最终试验报告。

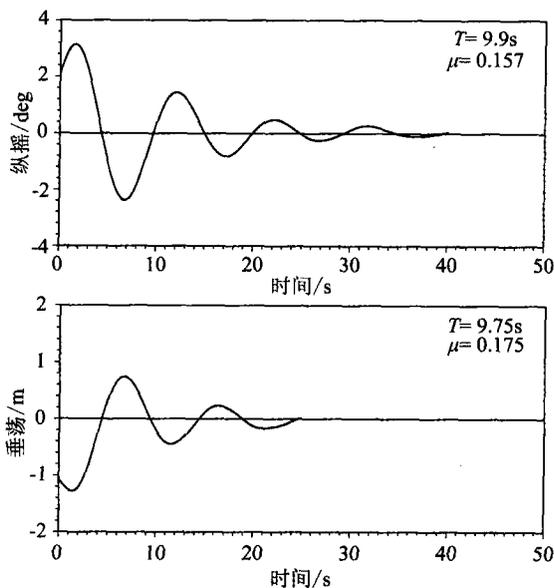


图 5-12 静水纵摇和垂荡衰减曲线

## 5.5 浮体及其系泊系统模型在静水中的测试

船舶和浮式海洋平台等浮体的模型本身在水平面内运动(纵荡、横荡、首摇)没有静恢复力或力矩。在外力作用下偏离平衡位置后,即使外力消失,也不会回复到原来的平衡位置,因而不存在模型本身的纵荡、横荡及首摇等周期性的运动。但是,当模型上配置了相应的系泊系统以后,便组成了一个完整的浮体及其系泊系统的模型。在外力作用下该系统会偏离原来的平衡位置,当外力停止作用后,系泊系统提供的静恢复力或力矩,使得整个系统绕平衡位置作周期性的振荡运动,最终回复到原来的平衡位置。因此,浮体模型及其系泊系统是作为一个整体在静水中进行纵荡等自由运动的衰减试验,试验结果分析得出的固有周期及无因次阻尼系数等是整个系统的重要参数。

系泊系统提供的静恢复力或力矩是否能够正确模拟,对于整个系统的运动固有周期,乃至后续风、浪、流试验中的运动和系泊力,都起着至关重要的作用。因此,在进行整个系统的静水运动衰减试验之前,还需要对系泊系统本身的力学特性,包括预张力、水平刚度等进行一系列的测试与验证。

### 5.5.1 系泊系统预张力的调节

将浮体模型置于规定的平衡位置,连接上系泊系统所有的锚泊线及拉力传感器。如果各锚泊线张紧的程度不一,则每根锚泊线对浮式平台不可能具有相同的定位功能。为了防止这种情况,无论在浮式海洋平台的实体或模型上,对每根锚泊线都要加上相同的预张力,使它们处于相同的张紧状态和具有同等的定位功能。海洋平台实体每根锚泊线的预张力在试验委托方提供的任务书中给出了规定的数值,范围一般为 50~150t,视平台的大小及实际工作水深

而定。模型每根锚泊线上的预张力数值可根据相似原理求得。

浮式海洋平台模型锚泊线预张力的调节比较困难,锚泊线的数目越多,调节的难度越大。这是因为浮体在静水中会晃动,如果多数锚泊线的预张力已调节至设定的数值,但当调节另一根锚泊线时,已调好的各锚泊线的预张力会发生变动而前功尽弃,如此反复调节,极为费时费工。

根据实际经验,采用下列办法一般可以收到事半功倍的效果。先把平台模型置于预定的平衡位置,然后在拖车上用夹紧装置将模型固定,并注意到夹紧装置放开时模型的平衡位置尽可能不要变动。对每根系在模型上的锚泊线适当张紧或松开,使数据采集系统采集得到的传感器拉力恰为规定的预张力数值。对所有的锚泊线逐一进行调节,即完成了各锚泊线预张力的初步调试。然后,松开拖车上的夹紧装置,使模型浮于平衡位置,再查看各根锚泊线的预张力数值,如有差异,则需进行反复微调,达到满意的结果为止。各根锚泊线上实测得到的预张力误差一般应小于规定预张力的 $\pm 5\%$ 。

### 5.5.2 系泊系统的水平刚度试验

这是在静水中对模型系泊系统的静力特性试验,目的在于获得在外力的静力作用下,模型的位移—受力变化曲线,是确定和验证系泊系统水平刚度的试验。通过水平刚度试验,可以验证对实际系泊系统进行模拟的准确性。

试验内容主要包括单根锚泊线的水平刚度校核、整个系泊系统的水平刚度校核、加入立管系统后的水平刚度校核等。这些试验都在静水中进行。

首先需要对单根锚泊线的水平刚度特性进行校核试验。将单根锚泊线按照正式试验时的形状布置在静水中,在其顶端,也就是导缆孔的位置施加一定的水平外力,测量其偏移的位移以及锚泊线的张力,然后多次变更外力的大小,依次测量相应的偏移量和张力,便可得到锚泊线张力随水平位移变化的特性曲线,即单根锚泊线的水平刚度曲线。试验中,锚泊线张力的范围应尽可能覆盖后续风、浪、流试验中预期将会达到的数值大小。将试验结果与理论计算结果进行对比分析,如图 5-13 所示。如果达到精度要求则可进行下一步试验,否则需要查找原因,甚至重新调整和模拟锚泊线。将系泊系统中的每一根锚泊线全部进行校核完毕后,方可进行下一步的试验。

接下来进行整个系泊系统的水平刚度校核试验。现以纵向(surge)的水平刚度试验为例进行说明:将所有经过预张力调节和水平刚度校核的锚泊线按照正式试验时的形式布置在静水中,整个系统处于平衡位置;然后在模型的中纵剖面上用挂砝码的方法向后施以一定的水平

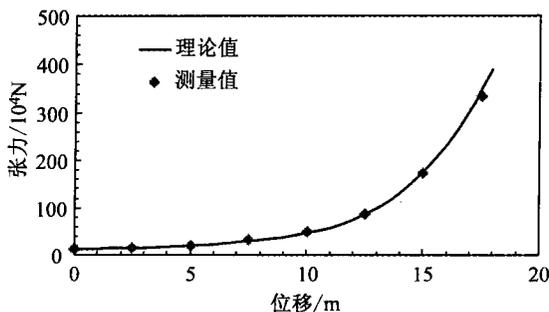


图 5-13 单根锚泊线的张力—水平位移特性曲线

拉力,模型受到拉力便向后移动,待整个系统静止后测量模型向后移动的距离,多次变更水平拉力的大小,依次测量得到模型相应的移动距离(即位移),最后可绘制成整个系统的纵向受力—位移特性曲线,或纵向静恢复力特性曲线。将试验结果与任务书给定的理论曲线进行对比分析,如图 5-14 所示。如果达到精度要求则可进行下一步试验,否则需要查找原因,重新进行调整和测试。

在进行整个系泊系统的水平刚度试验时,通常需要考虑几个不同的受力方向,如纵向和横向,或者沿着单根锚泊线的方向(inline)和沿着两根锚泊线之间的方向(between)。试验时方向的选择须根据不同系泊系统的实际要求和布置型式来定。对于其他方向的水平刚度试验,试验步骤以及测试内容与上述纵向(surge)相似,其结果也以相应的受力—位移特性曲线表示。

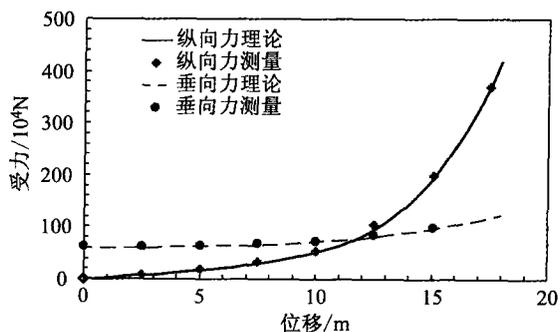


图 5-14 系统纵向受力—位移特性曲线

如果试验中需要加入立管系统,则应至少选择一个方向的系泊系统先进行水平刚度试验,然后加入立管系统,再进行同样的系统水平刚度试验,以验证立管系统对系泊系统的水平刚度特性是否产生影响。当然,此项试验是否必要,按具体情况而定。

### 5.5.3 浮体及其系泊系统模型的单自由度运动衰减试验

在系泊系统预张力调节和水平刚度试验都已完成而且所有校验参数符合要求之后,将浮式平台模型和系泊系统置于水池中规定的平衡位置,整个系统便具有静恢复力的特性。等待水静止后,即可开始进行单自由度运动的静水衰减试验。在外力作用下模型偏离平衡位置,当外力停止作用后,模型便产生了绕平衡位置周期性的振荡衰减运动,最后静止于原来的平衡位置。

对于不同型式的浮式海洋平台,要求进行的系统静水衰减试验的内容也不尽相同。对于系泊 FPSO 或者船舶而言,一般只要求进行纵荡方向的静水衰减试验。而对于其他型式的系泊浮体,包括浮筒、半潜式平台、张力腿平台和单柱式平台等,除了进行纵荡方向的静水衰减试验之外,往往还需要进行整个系统的横荡、垂荡、横摇和纵摇的静水衰减试验。

静水衰减试验的目的主要是测定整个系统运动的时间历程曲线(即衰减曲线),并分析得出运动的固有周期及无因次阻尼系数。这类试验的方法及分析的理论依据都与之前所述的模型自由横摇衰减试验相同。现以静水纵荡衰减试验为例简要说明如下:

对于在平衡位置的模型及其系泊系统,沿纵向向后拉至一定的距离后突然放开,于是整个系统绕原来的平衡位置产生单纯的周期性纵荡衰减运动,应用运动测量仪器可实时测量并记录整个系统的纵荡运动时历曲线。根据时历曲线可以方便地分析得到纵荡运动的固有周期及

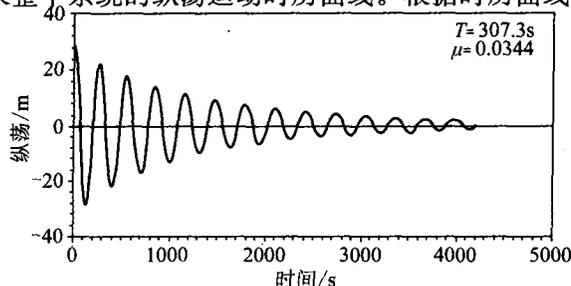


图 5-15 纵荡试验衰减曲线

无因次阻尼系数。图 5-15 所示为浮体模型及其系泊系统静水纵荡衰减曲线的实例。

在试验任务书中,试验委托方也会根据数值计算结果给出相应的固有周期理论值。通过静水衰减试验,获得实际固有周期的测量值后,应与相应的理论值进行对比,以达到验证的目的。如测量得到的固有周期与所要求的理论值一致,则可继

续进行试验,如不符合,则需要寻找原因。试验结束后,同样需要将静水衰减试验的结果,包括固有周期、无因次阻尼系数、衰减时历曲线,以及与理论值的对比情况,写入最终试验报告。

对于横荡及任意方向的振荡衰减运动的试验,其测量和分析方法与纵荡试验完全相似,不再一一介绍。

## 5.6 浮体模型的风、流作用力试验

与静水中的单自由度运动衰减试验、水平刚度试验类似,对船舶或海洋平台等浮体的模型进行风、流作用力试验,也是在正式开始风、浪、流试验之前所必须进行的一项校核性试验。试验目的是为了确定不同首向角情况下,作用于船舶或海洋平台模型上的风、流作用力及力矩系数,验证模型在试验中所受到的风力和流力是否符合实际要求,从而验证模型制作与模拟的准确性,以及风和流模拟的准确性。另外,通过试验获得这些系数也可以用于分析系泊系统或动力定位系统。

风、流作用力试验通常包括浮体模型在不同的吃水、不同的风速和风向、不同的流速和流向下的试验,并测量作用力和力矩。

试验中,将浮体模型按照不同的吃水、不同的首向角通过六分力传感器固定在水中,模型在风、流作用下不能移动,所承受的风、流作用力和力矩完全由力传感器承担并进行测量。根据试验中要求的风速或流速分别造风或造流,测量浮体模型所受到的全局坐标系下的三个方向分力和力矩,即 X 方向和 Y 方向的风力或流力,以及绕垂向轴的首摇力矩。对于除船舶和 FPSO 之外的其他类型海洋平台,还需要测量绕 x 轴的横摇倾覆力矩和力矩中心,以及绕 Y 轴的纵摇倾覆力矩和力矩中心。对测量得到的作用力和力矩  $F_{wc}$ ,根据下式计算相应的力和力矩系数  $C_{wc}$ :

$$C_{wc} = \frac{F_{wc}}{V_{wc}^2} \quad (5-9)$$

式中: $V_{wc}$ 为风速或流速。将力和力矩系数  $C_{wc}$  的测量值与试验任务书中给定的相应理论值(或风洞试验值)进行对比与分析。进而验证模型(特别是上层建筑)制作与模拟的准确性,以及风和流模拟的准确性。

风力/力矩主要受上层建筑模拟和布置的影响,如不满足要求,则需进行调整,增加或减少上层建筑,以及调整位置和方向,尽量在各个方向均满足试验要求。而流力主要与平台水面以下部分的外形有关,因此流力测量结果通常仅作为记录和参考,无法对模型进行重新调整。

# 第 6 章 模型在波浪中的试验

在完成模型制作与模拟、水池中海洋环境模拟、测试仪器准备和静态标定、浮体与系泊系统模型在静水中的测试、风和流作用力试验等各种准备工作后,便可进行模型在风、浪、流作用下的一系列试验。就整个试验研究项目而言,这是最重要的核心部分,因而常称为“正式试验”。通过一系列的试验并对测量数据进行处理分析后,便可全面预报整个海洋平台系统在实际海上水动力性能的各项数据,为完善海洋平台系统的设计、建造乃至运营提供科学依据。

由于整个试验内容的覆盖面较广,要求测试的数据又多,因此需要精心组织与周密安排,才能有条不紊地完成整个项目的试验任务。本章就有关问题分述如下。

## 6.1 试验前水池的准备事项

准备工作的细微周到是保障试验顺利进行的前提。在“正式试验”前水池的准备工作大体有下列各项。

### 6.1.1 模型在水池中的布置

船舶或海洋平台、系泊系统和立管系统等所有在试验中要用到的模型,都应根据几何相似原则,按照实体布置图布置在水池中的测量区域,使得整个系统在静水中的平衡位置符合正式试验的要求。其中,系泊系统和立管系统的布置尤为关键,而且通常在对系泊系统进行静水中的一系列测试校验之前就需要完成。

实际海上的锚泊线和立管线都是采用特殊的方式(如桩基、吸力锚等)固定在海底,而试验中的锚泊线和立管线模型则是直接焊接在假底上。为了正确地布置,往往要将水池中的假底升至水面,待干燥后用油漆画线作好各锚泊线和立管线的标记,对假底上的所有锚点位置进行焊接固定,并依次进行编号。图 6-1 为外转塔式系泊 FPSO 系统整套模型在水池中布置的平面图,系泊系统和立管系统分别由 12 根锚泊线和 12 根立管线组成,外输油系统由一艘穿梭油轮和一根串靠带缆的模型组成。

对于能够制造任意方向波浪的水池来说,整套模型在水池中只需进行一次布置即可。对于只能制造单方向波浪的水池而言,则要以规定的浪向为标准,对整套模型在水池中进行多次不同方向的布置,以满足模型在不同浪向作用下的试验。上海交大海洋工程水池是以变动模型布置的办法进行不同浪向作用下的试验,例如:如果图 6-1 所示为浪向  $180^\circ$  的试验,那么在进行浪向  $90^\circ$  的试验时,应将图 6-1 中的布置整体转动  $90^\circ$ ,而在进行浪向  $0^\circ$  的试验时,则要将图 6-1 中的布置整体转动  $180^\circ$ 。模型的这种整体转动是相当繁琐的,通常将模型在不同浪向时的布置一次性地在假底上用油漆画线作好标记,并焊接好固定点,正式试验时只需按照规定的浪向按画线标记重新布置所有模型,特别是锚泊线和立管线。

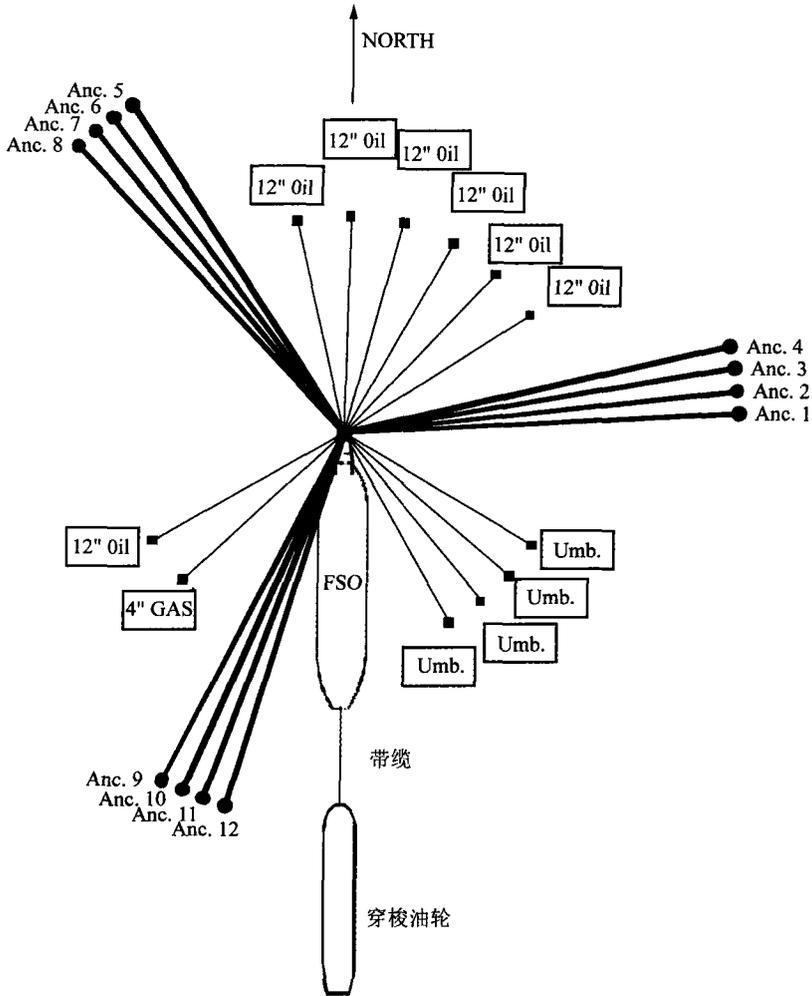


图 6-1 外转塔式系泊 FPSO 系统平面布置图

### 6.1.2 各单项试验的编号

海洋平台系统在风、浪、流作用下的模型试验所需要考虑和覆盖的内容较广。就平台模型的装载情况而言,通常要求进行满载和压载等不同装载情况下的试验;就波浪情况而言,通常要求在规则波、不规则波和白噪声不规则波中进行试验;就海洋环境条件而言,通常要求对生存海况(百年一遇的风、浪、流)及作业海况等进行试验,对不同浪向、风向和流向的组合情况进行试验;就系统状态而言,通常要求在系统完整和系统损坏(如单根锚泊线破断)情况下进行试验,等等。整个试验覆盖的内容可多达上百个单项试验,为此必须对整个试验内容中的各单项试验编号,以保证试验工作的有序进行而不致发生差错和遗漏。

实验室根据整个试验研究任务书中覆盖的内容,对各单项试验进行编号。编号方法既要有利于本研究任务的顺利进行,又要考虑到原始资料的存档和以后的查找核对。下列编号方法可供参考。例如 0605104,06 表示试验的年份为 2006 年,05 表示该年进行的第 5 个试验研究项目,1 表示在规则波中的试验(相应的 2、3 可分别表示在有风、流的不规则波中的试验和

在白噪声不规则波中的试验),04表示第4个单项试验。对于每一个单项试验在编号后,需简要列出模型的排水量、风(风速、风向)、浪(有义波高、浪向)、流(流速、流向)等数据。因而整个试验任务的各单项试验的编号表也是试验的执行计划表。例如要进行某一编号的单项试验时,工作人员可按要求在水池中造出相应的风、浪、流。另外,在试验的数据采集及分析的表格中,必须列出试验的编号作为标题,严格做到一一对应。

### 6.1.3 测试仪器的安装与布置

如上一章中所提到的,浮式海洋平台模型试验中所要用到的测试仪器种类繁多,数量更多。以图6-1所示转塔式系泊FPSO系统的模型试验为例,需要用到的测试仪器包括九种,共计50只(台、套):

- (1) 一台风速仪、一台流速仪用于测量试验中的风速和流速。
- (2) 七只浪高仪用于测量模型周围的波高以及模型上的甲板上浪。
- (3) 一套光学运动测量系统用于测量两个模型的六个自由度的运动。
- (4) 九只加速度传感器用于测量模型上3个典型位置处的三个方向运动加速度。
- (5) 20只拉力传感器用于测量12根锚泊线、七根立管线和一根带缆的张力。
- (6) 一只五分力传感器用于测量转塔上的系泊力。
- (7) 五只压力传感器用于测量转塔转盘和船首处的砰击压力。
- (8) 三台水上摄像机从三个方向拍摄模型在试验中的动力行为。
- (9) 两台水下摄像机拍摄立管系统模型和锚泊线在试验中的运动情况。

数十台测试仪器在正式试验开始之前,除了按照上一章所介绍的一一进行标定和准备妥当之外,还要一一安装布置到正确位置,而且要确保每一台仪器工作正常、测量数据正确。因此,在正式试验开始之前,测试仪器的安装与布置也是必不可少和工作量比较大的一项准备工作。

风速仪和流速仪的布置与其在环境模拟阶段的布置是不同的。在环境模拟阶段,风速仪和流速仪在模型所在的中心位置,主要用于测量和标定正式试验中要应用的风速和流速。在正式试验中,由于有模型布置在中心位置,所以风速仪和流速仪一般安装在模型一侧距离模型大约3~4倍宽度的地方,以实时监测试验中的风速和流速。

浪高仪的布置也与环境模拟阶段不同。在环境模拟阶段,采用三个浪高仪,分别布置在模型所在的中心位置、前方3~4倍模型长度距离、一侧5~6倍模型宽度距离,用于测量和标定正式试验中要应用的波浪情况。在正式试验中,由于有模型布置在中心位置,所以原来安装在此的浪高仪被取消,但安装在前方和一侧的两个浪高仪仍然被保留,以实时监测试验中的波浪情况。此外,为测量模型在风、浪、流作用下的甲板上浪、气隙或出水情况,还要在模型的一些典型位置(如首部、中部和尾部)安装布置若干只浪高仪,浪高仪的安装位置应与任务书中的规定一致。图6-2为半潜式平台模型上浪高仪的布置照片。

测量模型六自由度运动的光学运动测量系统包括两个部分,红外线灯球是安装在模型上的,对灯球运动坐标位置的测量是由专用的跟踪摄像头来实现。跟踪摄像头的安装和布置在上一章所述的标定过程中已经完成,除非测量区域和要求有变化,一般不需要重新安装和布置。灯球在模型上的安装与布置是需要正式试验之前完成的,布置的位置没有确切的规定,其指导原则可以参考上一章所述的内容。图6-3为外转塔式FPSO及穿梭油轮模型上灯球的布置照片。

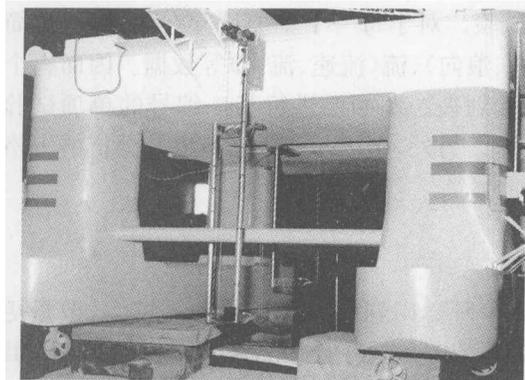


图 6-2 模型上浪高仪的布置照片

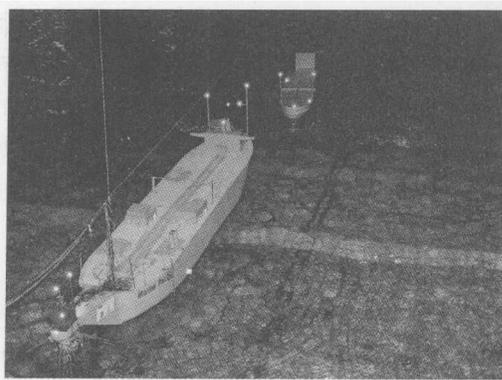


图 6-3 模型上红外灯球的布置照片

加速度传感器的安装与布置也是需要正式试验之前完成的。加速度传感器的安装位置应与任务书中的规定一致。如果需要测量同一位置处的三个方向加速度,则需要制作专门机构将三只加速度传感器安装在一起,而且保证它们相互垂直,安装在模型上时,与所需要测量的方向一致。图 6-4 为软刚臂系泊 FPSO 模型上加速度传感器的布置照片。

测力传感器的安装布置一般在系泊系统和立管系统的静水测试之前就已经完成,因此,在正式试验之前,除非有变动模型布置方向等特殊要求,一般不需要重新安装布置,只需要检查传感器是否工作正常、线路是否通畅等。图 6-5 为外转塔式系泊 FPSO 模型上测力传感器的布置照片。

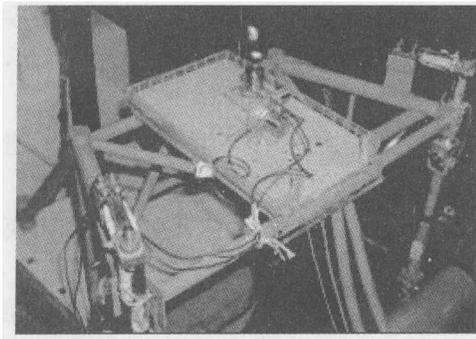


图 6-4 模型上加速度传感器的布置照片

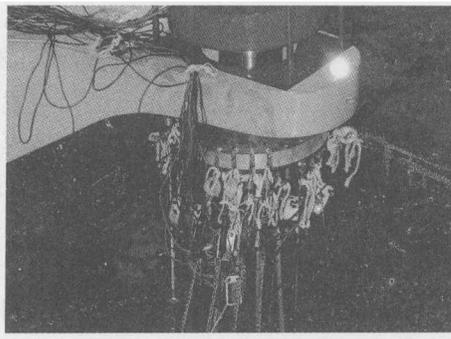


图 6-5 模型上测力传感器的布置照片

为了直观记录模型在风、浪、流中的运动态势,需要布置若干台摄像录像机以及相应的灯光照明,对于典型的运动态势则用高清晰度照相机拍照。对于水面以下立管或锚泊线的运动情况,需要配置水下摄像机和水下照明。总之,实验室应按照试验研究任务书中的规定,全盘考虑摄像、拍照及灯光等布置事宜。

所有测试仪器按照要求安装布置完毕后,都应检查相应的线路是否牢固接通,采用的仪器仪表是否工作正常,通道是否正确。

#### 6.1.4 测试仪器的接线与通道编号

浮式海洋平台模型整个试验内容中的每个单项试验要求同步测量的数据较多,大致可分为三个部分:

- (1) 海洋环境条件部分的风、浪、流数据。
- (2) 模型运动部分的横摇、纵摇、垂荡、纵荡、横荡、首摇等运动和某一位置的加速度或相对位移、角位移等数据。
- (3) 受力(载荷)部分的各锚泊线拉力、各立管线拉力、防碰撞压力、特殊构件处所受的力及力矩等数据。

实验室根据试验研究任务书中所规定的测试数据,在模型上安装和配置了相应的测试仪器,这些仪器都要用专用信号线接至相应的信号放大器或二次仪表,然后用专用信号线或数据线通过数据采集箱把信号采集进入采集计算机。

众多的各类测量数据有其各自的专用通道进入数据采集箱和计算机。为了避免采集数据发生混淆,必须对通道进行编号。一般说来,实验室备有 128 通道的采集箱,同时可以采集 128 路的不同测试数据,如果需要同时采集的测试数据超过 128 路,则可另行增加通道以满足试验需要。模型在风、浪、流中进行试验的测量数据少则 20~30 项,多则 70~80 项。通道编号一经规定,在整个试验中都不能随意变动,除非发生通道损坏等意外情况。一般按次序规定通道的编号,例如通道 1-风,通道 2-流,通道 3-波浪,通道 4-纵荡……通道 10-1 号锚泊线,通道 11-2 号锚泊线,等等,依此类推。通道规定后不仅采集得到所要求的测试数据,还可通过计算机给出时历曲线及统计分析结果。例如上述通道 4,可给出纵荡的时历曲线和统计结果。

接线的通道编号规定以后,必需检查线路是否接通,如果某一通道的线路接而不通,则在试验中测量不到该通道的相关数据。因此接线必需牢固而不能松动,线路接好后轻轻拨动相关的测试仪器,如果计算机上有所反映,表示线路已经接通。对每一通道的线路都要进行认真检查。在确认各项工作准备和检查完毕后,方可按照计划进行正式的试验。

## 6.2 模型在规则波中的试验

模型在水池的静水中处于平衡位置后,先检查各测量仪器的线路是否接通,其次检查各锚泊线上的预张力是否为设定的数值。检查无误后,清除各通道的采集数据并采零,便可开始进行规则波中的试验。

模型在规则波中的试验主要是为了获得浮式海洋平台在波浪作用下运动和受力的频率响应函数,包括幅值响应算子 RAO 以及相关的相位响应,用于校验和分析不规则波中的试验结果,而不是为了直接获得真实海况下的水动力性能。规则波中的模型试验还可以用于确定波浪慢漂力和力矩系数。在线性理论的假定下,根据规则波中的试验结果,通过计算分析可以预报任意海况下浮式海洋平台在不规则波浪中的水动力性能。但一般情况下都是以校验和分析不规则波中的试验结果为目的。

模型在规则波中的试验,一般把经过校验的平台模型与顺应式系泊系统一起安装在水池中进行。这种系泊系统并不一定是设计中实际的系泊系统,而通常由若干水平放置的带有弹簧的软绳组成,以提供足够大的纵荡、横荡和首摇固有周期,这样既可以把平台模型限制在一定的运动范围内,又不影响平台的波频运动。其他一些辅助设备如立管系统,在此类试验中,通常不需要安装。在平台模型上安装有非接触式六自由度运动测量系统,以测量波浪诱导运动。在系泊缆绳上安装有拉力传感器,这样通过力的平衡,就可以确定平台所受的约束力和力矩(三个方向上的力和力矩,即  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_z$ )。

模型在规则波中的试验通常不需考虑风和流的作用,直接按照第4章中模拟的8~12个不同频率(波长)的规则波进行8~12个单项试验。在每个单项试验中同步测量波浪、六自由度运动及有关载荷的数据。根据测量所得的波浪及其他数据的时历曲线,便可进行相关分析得到运动和载荷的幅值响应和相位响应。

对于每个单项试验而言,试验的具体步骤比较简单。先是启动造波机按要求在水池中制造规则波,待稳定的规则波到达模型后进行各项测量数据的同步记录。测试的时间根据国际船舶试验池会议(ITTC)的规定,需要获得模型在10个以上完整的规则波中的数据。因此,自记录开始,有12个左右的规则波经过模型即可停止造波和数据记录,便完成了该单项的试验。待水池中的水面平静后,即可开始进行下一个单项试验。按顺序依次进行8~12个单项试验,便完成了在一个浪向下规则波中的全部试验工作。如果要求模型在其他浪向的规则波中进行试验,则需按规定浪向变更模型的布置位置,重复上述的试验步骤。

### 6.3 模型在不规则波中的试验

这是浮式海洋平台模型试验中最重要的核心试验部分,试验的目的是为了直接获得海洋平台在真实海况下的水动力性能。试验内容包括百年一遇的极限海况和工作状态的海况、不同浪向及不同风、浪、流方向组合下的模型运动和受力情况。因此要求进行众多的单项试验,对每一单项试验要记录大量的测试数据,通过一系列的试验及其结果分析,全面预报浮式海洋平台在实际海上的水动力性能。

现就某一单项试验为例,说明试验步骤及有关规定。模型在水池的静水中处于平衡状态后,检查各测量仪器和线路是否接通、各锚泊线上的预张力是否为设定的数值,检查无误后清除各通道的采集数据并采零。即可开始按规定的风、浪、流条件进行不规则波中的试验,其步骤是:

- (1) 按要求在水池中造流,在流的作用下模型漂至某一平衡位置。
- (2) 按要求在水池中造风,在风的作用下模型移至另一平衡位置(这是风、流联合作用下的平衡位置)。
- (3) 按要求在水池中造不规则波。
- (4) 待不规则波到达模型约1min后,便开始同步记录所有的测试数据直至该单项试验结束为止。

关于每个单项在不规则波中的试验记录时间,国际船模试验池会议ITTC曾经作出的规定是:必须有200个周期的试验,也就是说必须有组成不规则波中的200个不同频率的波浪作用于试验的模型。但在海洋工程的模型试验中,并不执行ITTC的规定,每个单项试验的记录时间远比ITTC的规定更为严格。现时国际海洋工程界对于模型在不规则波中每个单项试验时间的不成文规定是:至少相当于实体在海上1小时或3小时,实际上多数研究项目要求不少于3h。根据缩尺比的换算,模型在不规则波中每个单项试验的持续时间常在10~30min。试验中各个通道记录和采样速度不少于每秒20次,即要求每秒钟采集20个数据。

每个单项试验的持续时间和采样速度通常都是按任务书中的要求而定。为了确保试验质量,在整个试验持续时间内,实时监视和显示各通道的记录数据和时间历程曲线。单项试验结束后立即可以给出各通道的统计分析结果,如果一切正常,则该单项试验认为已经顺利结束。

接下去按试验计划进行另一个单项试验。待池中的水面平静,模型处于平衡状态后,重复上述的试验步骤及有关规定,依次进行各个单项试验,直至试验计划中要求的所有单项试验全部进行完毕,便完成了模型在风、流及不规则波联合作用的试验任务。

在进行本项试验中,只要花费少量的时间,便可以获得模型的流力及风力等极为宝贵的试验资料。例如在某一单项试验中,造流后模型漂在某一位置,数据记录后便可分析得出所受的流力,同样,在造风后可通过记录数据得出所受的风力。

浮式海洋平台的类型较多,各种平台的试验要求也略有差异。除进行平台本身在不规则波中的模型试验之外,有时还要求在一些特殊情况下的试验。在测试内容方面有时还要求测量砰击次数、砰击压力、甲板上浪次数、上层建筑受上浪的冲击力等。这些差别仅限于试验的繁、简和要求测量数据的多少,因此,上面所介绍的试验步骤及有关规定适用于各种浮式海洋平台模型在风、流及不规则波中的试验。

## 6.4 模型水动力试验的种类

浮式海洋平台的类型较多,需要进行的模型水动力试验的内容也各有不同。如果以波浪进行分类,可包含规则波和不规则波中的试验,如上两节所述。如果以试验目的分类,则可包含多种试验内容。

### 6.4.1 白噪声不规则波试验

模型在白噪声不规则波中试验的目的与规则波中的试验相同,主要是获得浮式海洋平台在波浪作用下运动和受力的频率响应函数,包括幅值响应算子(RAO)及相位响应函数。严格来说,这是一种实验技术的改进,模型在白噪声不规则波中的的一次试验可以替代在规则波中8~12次试验。而且可以分析得出同样的试验结果。有些试验研究项目的委托单位,从仔细、保险和进行多方互相校核的严格要求出发,在任务书中既规定了模型在规则波中的试验,又规定了模型在白噪声不规则波中的试验。因此,有时也把规则波试验和白噪声不规则波试验统称为幅值响应算子(RAO)试验,而且通常在不规则波试验之前进行。

模型在白噪声不规则波中的试验,通常不考虑风和流的作用。模型在处于静水中的平衡位置后,检查各测量仪器的线路通道和各锚泊线的预张力,检查无误后清除各通道的采集数据并采零。然后启动造波机,按照第4章中模拟的白噪声波谱在水池中造出不规则波,待不规则波抵达模型约1min后,开始同步测量各项数据,试验的持续时间、数据记录的采样速度以及试验过程中实时监视和显示等项都与第6.3节中所介绍的相同。一个浪向的试验结束后,如要进行其他浪向的试验,则应变更模型的布置位置,重复上述的试验步骤。

### 6.4.2 风、浪、流联合作用下的运动及系泊载荷试验

风、浪、流联合作用下的运动及系泊载荷试验是整个模型试验中最为重要的部分,主要目的是对平台在风、浪、流联合作用下,也就是实际海况下的运动和受力进行测量和记录,以分析平台及整个系泊系统的水动力性能,提供真实海况下的平台运动、漂移、加速度、上浪以及系泊载荷的数据,有关立管性能的数据,并研究任何可能发生的碰撞,如立管与立管、立管与系泊缆、平台与系泊缆和立管之间的碰撞。

试验的步骤与第 6.3 节中所述不规则波试验基本相同。试验需要测量的物理量包括:平台的六个自由度运动,平台若干重要位置处的三个方向加速度,系泊系统每根锚链的系泊力,立管系统的受力,风速、流速、波高,平台典型位置处的相对波高(甲板上浪、气隙、出水)等。

此项试验将按照试验大纲要求,进行不同海域环境条件、不同风、浪、流组合、不同装载情况、不同锚链布置情况和破断情况等的多个试验。试验委托方对平台的运动极值、系泊系统的最大系泊力、平台上浪或者气隙问题比较关心,应在试验结束后尽快给出初步结果。如果对结果有所疑问,可进行重复试验加以验证和对比。

#### 6.4.3 全动力定位系统试验与辅助动力定位的系泊系统试验

该项试验的目的主要为:

- (1) 确定稳态动力定位能力预报,研究平台模型在稳定的风、浪、流作用下保持固定的位置和首向角的能力,以及在各个不同方向上所能承受的最大稳定风速和流速。
- (2) 在全动力定位控制下的各指定试验工况中,验证能否达到足够的定位精度。
- (3) 对辅助动力定位下的系泊系统进行试验研究,确定定位精度,验证其稳定性和可靠性。
- (4) 为设计提供试验依据。

试验中,首先安装动力定位模型试验系统,并进行系统联调。根据试验要求,采用或设计控制策略及控制方法,并在模型试验中不断优化子系统各参数,确定各个不同方向上所能承受的最大稳定风速和流速。进行全动力定位模型试验,预报定位精度,并对整套系统进行研究、分析和完善,确定各工况定位精度。进行系泊系统的模型试验单独调试,根据刚度曲线,调试好系泊系统。进行辅助动力定位的系泊系统试验,预报定位精度,测量平台运动、推力器受力及系泊系统受力情况。

试验应在风、浪、流联合作用的实际海况下进行,试验步骤与不规则波试验相同。

#### 6.4.4 多浮体系泊作业试验

多浮体系泊作业试验主要指有两个以上的浮体通过柔性系泊的形式连接在海上作业的模式试验,通常主要针对 FPSO 与串靠和旁靠穿梭油轮组成的多浮体系统。

该项试验的目的是:

- (1) 提供真实海况下的多个浮体的运动、系泊力情况,以及是否会发生多个浮体之间的碰撞等现象,验证多个浮体系泊在一起是否安全。

- (2) 确定进行多浮体系泊作业的最大海况,并确定需要什么样的控制来保持浮体的稳定。

试验中,要求多个浮体模型与其相互之间的系泊系统安装在一起。此外,如果需要考虑输油的软管系统对整体性能的影响,则还要模拟输油的软管系统;如果穿梭油轮装有推进器,或者对于装有辅助推进器的 FPSO 和装有动力定位系统的穿梭油轮来说,还需要模拟控制系统的特性。

主要进行风、浪、流联合作用下的运动和系泊载荷试验,试验步骤与不规则波试验相同。试验对于海洋环境条件的选择应集中在限制其作业的临界条件,特别是风、浪、流不同向的环境条件。测量的内容主要包括:多个浮体的六自由度运动以及相互之间的相对运动、最小间距,系泊系统的系泊力,浮体与浮体之间的系泊缆的受力,浮体与浮体之间的碰撞力,以及风

速、流速、波高等物理量。

#### 6.4.5 甲板上浪、气隙及波浪砰击试验

浮式海洋平台甲板上浪试验的主要目的是确定甲板上浪的频率,同时测量上浪水对船体或甲板结构的砰击载荷,从而评估平台甲板上浪对甲板结构与甲板设备造成损害的严重性。在此基础上通过甲板上浪试验,还可进一步修改与优化平台设计,以减小上浪的频率及其对甲板结构与设备造成的影响,从而尽可能减小结构失效的风险。

在甲板上浪试验中,平台模型的首部甲板应安装数个电阻式浪高仪,组成浪高仪阵列,以监测试验中发生甲板上浪的次数,同时测量上浪时甲板不同位置处的水深分布与变化情况。平台甲板或首部还应安装压力传感器,以测量上浪水对平台首部结构造成的砰击载荷。在甲板上浪试验中,通常在平台侧面或上部安装数台高速摄像机,同时平台模型的首部还画有较为明显的方格,便于从录像中观察上浪形成飞沫或上浪水越过甲板时所达到的高度,从而验证或修正浪高仪的测量结果。

对于半潜式平台、SPAR 平台和 TLP 等深海浮式平台而言,其在生存条件下的气隙大小是评价其水动力性能的重要参数。而气隙试验即通过测量平台与水面之间的相对波面升高,从而判断水面与平台甲板底部之间是否发生砰击现象。

在气隙试验中,在平台模型的甲板底部至水面间应安装数个电阻式浪高仪。这些浪高仪随平台共同运动,从而测量水面与平台底部之间的相对波面升高。通过将测量所得到的相对波面升高与平台干舷大小相比较,即可判断平台气隙是否为零。若平台气隙为零,则说明波面与平台甲板底部间发生了砰击现象。同时,在气隙试验中,在平台底部通常还安装摄像机,从而可通过试验录像观察平台气隙的变化情况。

平台砰击试验的主要目的是通过在生存海况下,测量平台首部或底部位置砰击载荷的大小,研究波浪砰击对平台结构可能产生的危害。同时通过对平台首部形状进行修改与优化,以研究尽可能减小其所受到的砰击载荷。

在平台的砰击试验中,应在平台模型的首部或底部等可能发生砰击的位置布置数个压力传感器,测量不同位置处发生波浪砰击时,平台结构所受到的载荷大小及其分布情况。同时,在试验中的平台模型一侧,应安装高速摄像机,拍摄砰击发生的全过程,从而通过试验录像观察砰击现象。在砰击试验的结果分析中,应特别关注砰击载荷的最大值,进而判断砰击是否危害平台首部和底部的结构。

#### 6.4.6 立管的涡激振动试验

在海流作用下,大跨度的海底管线、立管、锚链和拖缆等长柔性构件后方会不断释放旋涡,并使得这些构件产生横向振动,这就是涡激振动现象。涡激振动现象会给海洋结构物带来不利影响,严重的涡激振动将造成柔性构件的结构疲劳破坏。涡激振动试验的目的是通过试验测定细长柔性构件在海流的作用下,发生涡激振动现象的可能性和振动幅度的大小,从而判断其对柔性构件可能产生的结构损伤程度。

涡激振动试验的场所分为两大类,第一类是水池实验室,第二类是自然环境条件,如近海岸或江河湖泊。实验室内拖车速度易于控制,还可以通过制造流场来模拟实际环境,采集设备使用方便,但是模型缩尺比较大,柔性构件的长度受水池尺度影响较大。自然环境条件下的试

验可以选取较长的柔性构件,缩尺比小,更接近实际情况,但是流速不易控制,采集设备布置难度大,因此试验成本较高。

涡激振动试验中最重要的一步是设计一个合理的试验装置,该装置要能够为柔性构件提供支撑,便于安装测试装置,与拖车或船只紧密连接。而且在实验室条件下,该装置最好有提高流速的功能。设计这样一个试验装置难度较大,目前大多数涡激振动试验装置选择的试验场所是长度较大的拖曳水池,由拖车拖动,以获得较高的流速。

涡激振动试验主要测得柔性构件的振动模态、振幅和频率等,获得这些物理量可以通过以下三种方法:

- (1) 在柔性构件上贴应变片。
- (2) 在柔性构件中放置加速度仪。
- (3) 利用水下高速摄像机拍摄。

在柔性构件上贴应变片的方法成本较低,但精度有限。在柔性构件中放置加速度仪的方法可以提高精度,但是由于加速度仪本身有一定重量,对柔性构件的重量分布会产生影响,如果测量点过多,连接线在柔性构件中比较拥挤,信号会受到相互干扰影响。利用水下高速摄像机可以获得较准确的振动模态数据,但是需要配备有专业的处理软件,设备成本较高。

无论选择哪种试验场所,拖车或船只自身的振动影响必须降到最低,否则无法获得准确的试验结果。

#### 6.4.7 深吃水立柱结构的涡激运动试验

深吃水立柱结构在海流的作用下,会在立柱周围不断释放旋涡,并使得立柱结构在水平面内产生周期性的往复运动,这就是涡激运动现象。这种释放涡的频率如果和立柱结构的固有频率接近,就会对结构产生不利的影响。一般情况下,深吃水长立柱结构比较容易发生涡激运动,因此涡激运动的试验研究主要集中在 SPAR 平台。

涡激运动试验的目的是:通过试验,获得深吃水立柱结构涡激运动的运动频率以及相关的运动幅值,并与立柱结构的固有频率相比较,以判断深吃水立柱结构是否会发生涡激运动现象以及发生的严重程度。

涡激运动的试验场所一般选在有一定长度的拖曳水池。试验装置安装在拖车下方,由拖车带动试验装置在水中匀速运动,水池必须有一定长度才能保证涡激运动达到稳定状态。试验中还要排除其他风浪影响,因此拖曳水池是最理想的试验场所。涡激运动试验前一般需要准备一个试验装置,通常为方型框架,框架四周水平布置 SPAR 平台系泊链,框架中央布置 SPAR 模型,并与系泊链相连。框架由拖车带动。由于涡激运动是在水平面内发生的运动,可以在框架上设置特殊机构,以约束 SPAR 发生横摇和纵摇运动。试验中要测量的物理量是 SPAR 的六自由度运动。

安装好试验装置后,开动拖车,达到预定速度后匀速前进。在一定时间后,SPAR 平台的涡激运动稳定下来,产生比较明显的周期性往复运动。采集相关运动数据,并进行数据处理与分析。

#### 6.4.8 自航或拖航过程的耐波性试验

自航或拖航过程的耐波性试验的目的是:对深海平台或者其运输船舶在自航或拖航过程

中的运动状态和甲板上浪等现象进行研究分析,掌握相关数据和规律,为在方案设计中提高航行过程中的安全性和舒适性提供可靠的依据。

试验在具备造波功能的、且有一定长度的水池中进行。如果只考虑迎浪和顺浪情况,则对水池宽度要求不高,一般在具备造波功能的船模拖曳水池中即可进行,而且航速稳定、航行距离长。如果要考虑斜浪和横浪情况,则对水池宽度要求较高,一般需要在具备造波功能的海洋工程水池或耐波性水池中进行。

对于自航过程的耐波性试验,模型内部要安装动力装置、齿轮箱、轴承、螺旋桨和舵等装置,并需具备遥控功能。对于拖航船舶或平台模型的耐波性试验,模型内不需要以上设备,由水池拖车拖带航行。

试验中需要测量分析的物理量包括:

- (1) 模型六自由度运动。
- (2) 模型航行线速度、角速度。
- (3) 模型典型位置处的甲板上浪或底部出水情况。
- (4) 模型重要位置处的加速度。

试验步骤为:

- (1) 调节水深至指定深度,完成模型准备。
- (2) 开始造波,稳定后启动模型或开动拖车拖带模型,按照一定的方向在水池中航行,在航速达到要求后开始采集,在经过稳定段时间后停止采集。
- (3) 模型返回出发点。
- (4) 重新开始造波,并保证模型在下一个稳定段时间开始后进行数据采集。
- (5) 重复上述步骤,直到模型在一个浪向条件下遭遇的波浪周期数目满足要求,停止试验。

由于水池宽度和长度有限,而遭遇波浪周期数目一般要求较大( $>200$ 波周期),通常需要进行多次试验才能满足要求。

#### 6.4.9 安装就位试验

安装就位试验的主要目的是验证海洋结构物的安装就位过程是否实际可行和安全,确定能够安全进行安装就位作业的极限海况,并测量海洋结构物在安装就位过程中的动力响应。

安装就位试验通常需要在不规则波,甚至是多方向的不规则波,以及有风、有流的实际海洋环境下进行。水池中试验的环境条件通常是能够进行安装就位作业的最为恶劣的海况(作业极限海况)。同时,还需要验证即使在这样的作业极限海况下进行安装就位作业,海洋结构物仍保持有足够的系数。在某些海域(如西非),主要的环境影响因素是长时间的涌浪,并且这些涌浪在任何环境下都是不可避免的。

对于 TLP、SPAR、半潜式平台等深海平台,通常由驳船将平台拖至预定海域进行安装就位作业。因此,此类平台的安装就位试验应模拟以下过程:

- (1) 平台在驳船上的滑行阶段。
- (2) 平台在驳船上的纵向转动(即纵倾变化)加滑行阶段,这一阶段,平台将绕驳船上的支点进入水中。
- (3) 水中平衡阶段,该阶段中,平台完全进入水中,既有纵向移动,还伴有先下沉后上浮,

摆动数次后,达到相对平衡状态。

安装就位试验中,要对以上作业过程中平台及驳船的运动进行全过程测量记录。同时应针对不同类型平台,设计相应的装置测量驳船上支点等处的受力。

FPSO 常由拖轮拖至预定海域安装就位,安装就位试验应模拟以下过程:

- (1) 锚泊系统的安装。
- (2) FPSO 与系泊系统的连接。

如果安装过程在进行到一半时,由于出现恶劣海洋风暴而不能继续进行的话,此时尚未完成的系泊系统仍应能够抵抗和生存。

#### 6.4.10 解脱与再连接试验

海洋油气开发工程系统庞杂,常需要多个浮体结构相互连接、共同工作才能保证系统的正常营运。为了减少操作时间和安全操作、及时避免台风等极端环境的损害,设计开发部门结合海洋工程实际需要,设计了各种各样的快速连接/解脱装置(Quick Connect/Disconnect equipment)。由于复杂多变的海洋环境对连接方法和形式提出了很高的要求,因此海洋油气资源开发企业和工程设计公司在工程设计阶段均要开展相应的系统解脱与再连接试验,检验连接系统的有效性以及在实际作业中可能出现的问题,从而改进工程设计和操作规程。目前主要开展的解脱与再连接试验主要以下面两类试验为主:

##### 1. 系泊系统与 FPSO 等浮式生产系统的解脱与再连接

浮式生产系统开采作业时通过各种系泊系统系留在作业海域生产油气,开采完毕后可移动到其他海上油田作业。系统的可解脱/连接特性大大提高了营运效率和生产效益。由于这些浮式生产系统的体积庞大、所处海域海况复杂,因此如何方便、快捷、安全地将他们和作业海域的浮筒、转塔等各种系泊系统连接起来,并在完成作业或安全需要时迅速解脱是 FPSO 等浮式生产系统操作的重点和难点。

##### 2. FPSO 等浮式生产系统与穿梭油轮等输运工具间的解脱与再连接

海上油田生产的大量油气需要通过船运或管道等途径外输。目前,通过定期的穿梭油轮外输油气是海洋工程油气开发的常用方法之一。将 FPSO 等生产平台与穿梭油轮等外输工具等通过缆线连接起来以及解脱开来是通过穿梭油轮外输油气方法中的常规操作。如何保证外输连接和解脱作业的安全、快捷,需要在设计中详细考虑。

由于以上连接与解脱操作涉及多个浮体(浮筒、转塔、船、平台)的安全,与浮体运动、装载情况和作业海域海况等密切相关,操作复杂且必须确保安全。因此,开展系统的解脱与再连接试验是十分必要的。

解脱与再连接试验一般是在完成浮式生产系统等海洋油气开发装备在生存环境和作业环境下的模型试验后进行,据此可以确定系统解脱与再连接试验的具体海洋环境情况。解脱与再连接试验的基本试验原理和相似定律等与海洋工程结构物耐波性试验类似。所不同的是增加了解脱与再连接的操作过程。

试验的主要目的为:

- (1) 检验连接/解脱装置在复杂海洋环境下的有效性。
- (2) 测量解脱与再连接过程中各个浮体的运动情况。
- (3) 测量解脱与再连接过程中各浮体所受载荷的变化及极限载荷的情况。

(4) 评估解脱与再连接过程中是否会发生碰撞等情况。

(5) 确定可安全进行连接/解脱作业的限制海况。

试验中,应考虑设计所要求的解脱与再连接可能发生的海况,如正常作业海况、安全操作要求的限制海况等;应考虑不同解脱与再连接作业情况下的典型设计载况。

试验工况一般选取典型的解脱与再连接状况,尤其是两个连接浮体间相对位置(高度)改变较大的情况。如在 FPSO 油气外输试验中,既需要考虑 FPSO 满载、穿梭油轮空载时二者连接的情况,也需要考虑完成输油后 FPSO 空载、穿梭油轮满载时二者解脱的情况。解脱与再连接试验结果受操作动作、操作过程和瞬时海况的影响较大,为得到有价值的信息,需要在设定海况下进行多次操作,并对结果进行比较分析。

试验测量内容主要包括:

(1) 海洋环境条件,包括整个试验过程中的风、浪、流等。

(2) 多个浮体的运动(转塔、平台、船、浮筒等)。

(3) 连接处在解脱与再连接全过程中的载荷变化等。

试验中应注意的主要问题:

(1) 解脱与再连接试验的数据分析应注意操作动作与载荷和运动分析相互对应起来,只有这样才能正确分析解脱与再连接操作可能带来的各种影响。

(2) 试验录像是分析解脱与再连接试验结果的重要工具,除了浮体运动需要监视外,还必须对解脱与再连接处的连接装置工作情况进行密切关注,才能获得有价值的信息。

(3) 解脱与再连接试验结果受操作熟练性和重复性的影响,试验前试验人员应对操作过程反复演习,提高熟练程度。

#### 6.4.11 倾覆试验

海洋工程结构物在风浪中的倾覆是十分复杂的问题,其主要困难在于随机外载荷的确定和大幅度横摇的非线性性质。海洋结构物在横浪情况下的大幅度横摇以及在随浪状况下,由于波浪周期性遭遇而产生的、随时间周期性变化的回复力矩引起的参数共振是倾覆的主要原因。目前,海洋工程结构物的倾覆机理还没有完全解决,因此,模型试验是研究倾覆的可靠手段。

试验的主要目的是研究海洋结构物在风浪环境中的安全性,确定结构物最小倾覆力矩和横倾角。

海洋工程结构物在风浪中的倾斜过程,将同时受到风倾力矩、回复力矩、惯性力矩和阻尼力矩的联合作用。因此,倾覆试验中,模型与实船应满足的相似条件除几何相似、质量分布相似等以外,还应满足阻尼力矩相似、风压力矩相似等条件。

倾覆试验应选取海洋结构物工作或定位海域的恶劣海况为模型试验的环境条件。风浪条件应包括迎浪、横浪和随浪等多种浪向。由于在不规则波中结构物倾覆发生的时间是随机的,因此模型试验所持续的时间要足够长。

虽然实际波浪都是随机的,但一系列持续时间较长,可能导致共振的规则波列对于海洋结构物来说也是非常危险的。因此倾覆试验还应包括模型在规则波中的工况。

倾覆试验过程中,应对结构物的六自由度运动特别是横摇运动、系泊系统受力等进行测量和记录,以获得倾覆时的横摇角度等动力响应数据,进而得到结构物倾覆时的最小倾覆力矩,

确定海洋结构物在风浪环境中横摇运动等的稳定区域、临界状态等。

## 6.5 试验数据实时采集系统简介

试验数据实时采集系统是为进行海洋平台模型试验的基本测试手段,是由硬件设备和专用软件组成为一体的系统。只有当硬件和软件的性能相匹配,工作稳定正常,才能共同完成实验数据的采集任务。试验数据实时采集系统的原理可以由图 6-6 的框图来表示。系统硬件设备的组成如图 6-7 的照片所示。

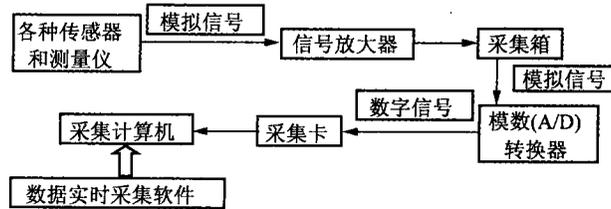


图 6-6 数据实时采集系统的原理框图

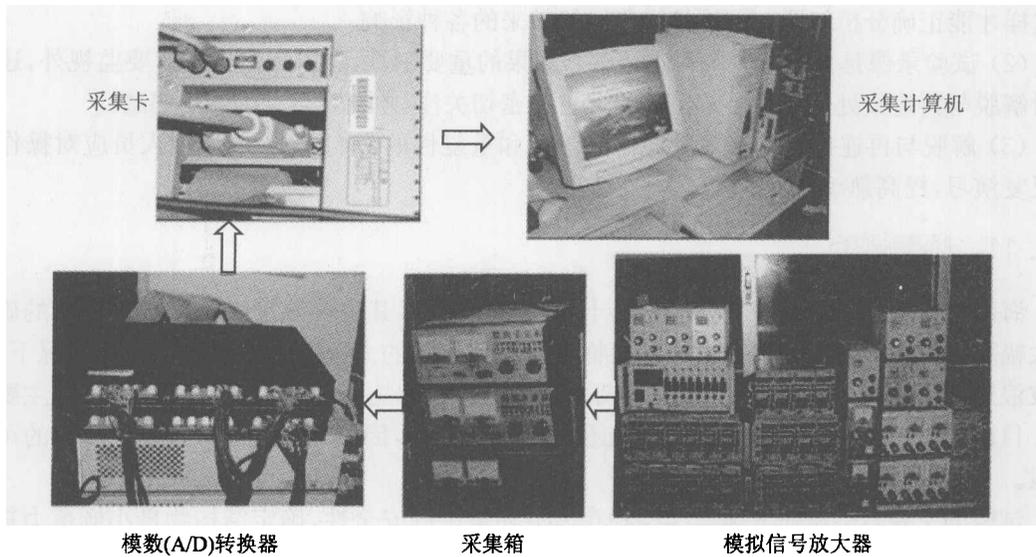


图 6-7 数据实时采集系统的硬件设备

各国海洋工程水池试验数据实时采集系统的功能基本相似,现以上海交大海洋工程国家重点实验室为例,简要介绍实时采集系统所具有的功能。

(1) 数据采集的通道数为 128,试验中可任意选用 1~128 通道进行数据采集。在要求记录的测试数据多于 128 项时,可增加通道数目以满足试验需要。

(2) 每个通道数据的最高采样频率为 1 000 Hz,试验中可在 1~1 000 Hz 之间任意选用采样频率,实际工作中常用的采样频率为 20 Hz、25 Hz、30 Hz、40 Hz,相应于每秒钟采集 20、25、30、40 个数据。

(3) 系统总的信息采集时间仅受硬盘容量的限制。以目前计算机技术的发展水平,普通

硬盘的容量一般都能满足整个项目的所有试验数据采集的需要。

(4) 采用基于 Windows 操作系统的可视化、集成化专用软件, 兼顾实时数据的显示速度和数据的采集能力。

(5) 软件自动生成的采集数据文件, 是以实验室特定的二进制数据格式来存储采集的数据, 并以标准方式命名。上海交大海洋工程水池采集数据文件是以月、日、时、分作为标准方式命名, 例如 12031539.out, 表示 12 月 3 日 15 时 39 分采集的试验数据文件。

(6) 数据采集系统具有实时数据统计与数据处理能力, 每个单项试验的数据采集结束时, 立即可以列表给出所有通道采集数据的基本统计值, 如最大值、最小值、平均值及均方差等。

(7) 本采集系统能同局域网内其他计算机上的采集或驱动系统进行通讯, 协同工作。

(8) 试验过程中可用以数据采集的显示和监视, 如图 6-8 所示。也可在试验开始前用于仪器的标定。

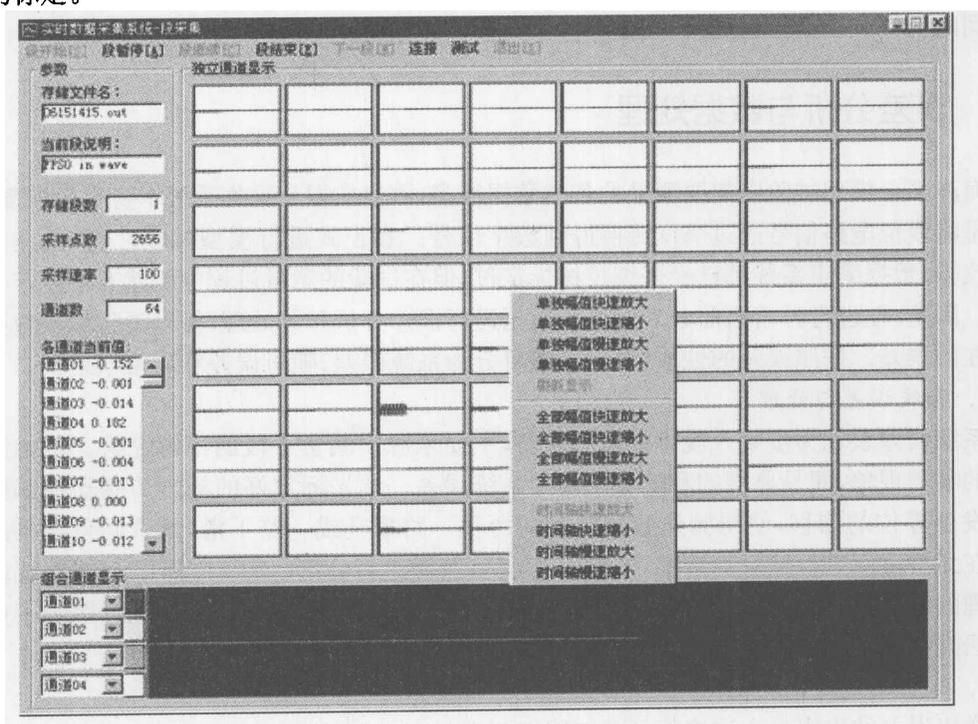


图 6-8 试验过程中数据采集的显示

# 第 7 章 试验数据的处理与分析

海洋工程模型在水池中的试验结束后,对自动采集系统获得的各类测量数据必须进行处理与分析。主要包括试验数据的误差分析与预处理,试验数据的高低频分离,风、浪、流及各种动力响应的全频、低频和高频信号的统计分析、谱分析和交叉谱分析,以及分析结果所需的各种图表输出和打印。

自动采集系统的原始数据是测量的模型数据,而试验研究报告中所给出的必须都是实体的数据。因此,在数据分析过程中,需要根据缩尺比的大小和相似理论中模型与实体各种物理量之间的转换关系,将模型的数据全部换算到实体的数值。

## 7.1 误差分析与数据处理

海洋平台模型试验中需要测量的各类数据很多,测量数据和采集系统本身也比较复杂,通常都是将模拟电路信号通过 AD 转换得到数字信号。在正式进行模型试验之前,虽然对各种测量仪器、数据采集系统都已经仔细校核标定过,但在试验的测量过程中仍然有可能产生各类误差。因此,在进行分析之前必须对试验数据进行误差分析和预处理,借以消除测量数据中可能存在的误差。按照误差的性质,试验误差可分为系统误差、随机误差和异常误差。

### 1. 系统误差与处理

系统误差表现为按某一规律变化的误差,主要来源于测量手段的不够完善。例如测力传感器的零漂现象,便是典型的和经常出现的系统误差。预先标定好的测力传感器在试验开始后却发生零位的漂移,使得测量数据的时间历程一路攀升或一路下滑,导致测量结果严重失真。在无法重新进行试验的情况下,必须对测量数据进行处理。图 7-1 所示为某次试验中数据处理的结果,图 7-1 中上方图为原始测量数据具有零漂的曲线,图 7-1 中下方图为采用最小二乘法光顺处理纠正零漂后数据的曲线。

### 2. 随机误差与处理

随机误差的出现是由许多不可预知因素所引起,包括环境的温度、湿度、空气的抖动、电路中电压的波动以及测量设备中零部件配合不稳定等诸多因素,都会时时刻刻影响到测量系统,导致测量数据发生误差。随机误差总是不可避免的,只能在数据分析过程中进行处理。由于在试验过程中采集系统的采样频率很高,随机误差也随之表现为高频的不规则振荡。在处理中只要给定合适的频率界限,通过 FFT 滤波处理将测量信号进行高低频分离,保留低频信号,去除高频信号,即可消除随机误差。图 7-2 为某次试验中数据处理的结果。图 7-2 中上方为原始测量数据与处理后数据的曲线对比,低频曲线上下的低频不规则振荡(俗称毛刺)即为随机误差,图 7-2 中下方为应该去除的高频信号(随机误差)曲线,经过处理后的低频曲线便会相对光顺。

### 3. 异常误差与处理

在测量数据的曲线中,有时会出现个别的数据点明显异常,偏离曲线的整体规律,即所谓

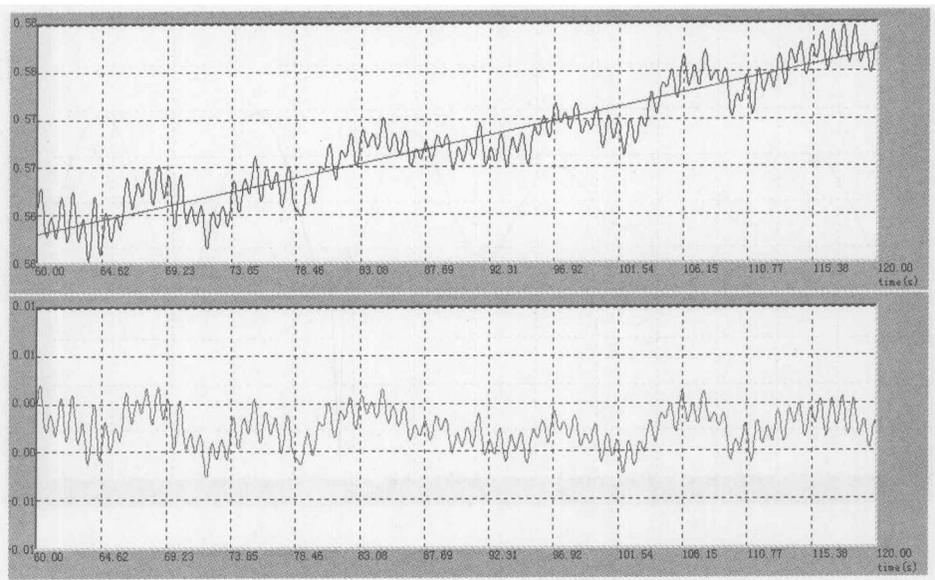


图 7-1 系统误差的处理

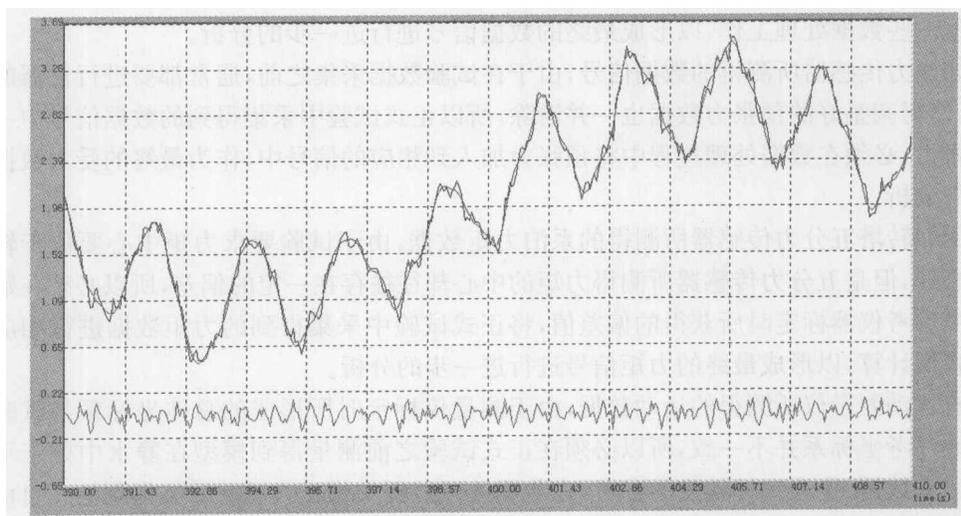


图 7-2 随机误差的处理

的“跳点”现象(wild spot, 俗称野点子)。一般情况下,在测量数据中出现跳点现象便视为异常误差。异常误差的处理比较简单,剔除异常数据,代之以前后两点数据的平均值即可。图 7-3 为某次试验中对异常数据的处理结果。

应该指出,在测量数据曲线中出现明显的跳点,并不一定就是异常误差,这要看具体的试验目的而定。例如浅水中 FPSO 是否碰底的试验,船舶或海洋平台在波浪中砰击的试验等。在整个试验过程测量数据的时历曲线中,出现跳点的次数即表示在该时段中的发生碰底或遭遇砰击的次数。如果在模型碰底或遭受砰击的部位安装压力传感器,则测得跳点的极值即为遭受瞬时冲击压力的“峰值”,而这正是试验所需要的数据,绝对不能作为异常误差而予以剔除。

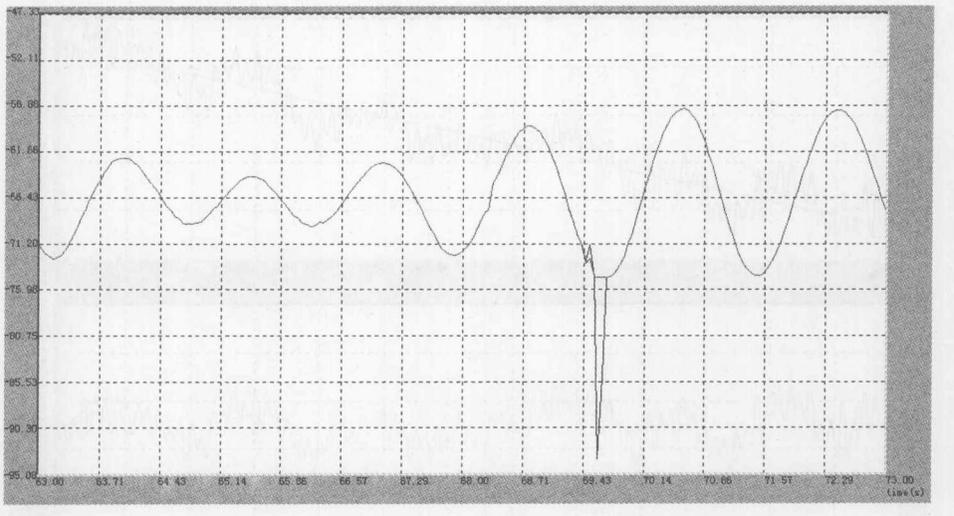


图 7-3 异常误差的处理

除了对试验测量数据进行误差分析和相应的处理之外,在进行数据分析之前,还可能需要进行其他一些数据处理工作,以形成最终的数据信号进行进一步的分析。

例如测力传感器所测得的数据信号,由于在试验数据采集之前,通常都要进行仪器的清零和采零,使得调整好的预张力数据也一并清除,所以正式试验中采集得到的数据信号中一般不包含预张力,必须在数据处理过程中将预张力加入到相应的信号中,作为最终的受力数据进行进一步的分析。

又例如转塔五分力传感器所测得的系泊力矩数据,由于试验要求力矩中心要位于转塔的转盘中心处,但是五分力传感器所测得力矩的中心却往往存在一定的偏差,所以必须在数据处理过程中参考仪器标定时所获得的偏差值,将正式试验中采集得到的力矩数据进行相应的力矩中心转换计算,以形成最终的力矩信号进行进一步的分析。

还有运动测量仪所测得的运动数据,由于测量仪标定时所形成的总体坐标系与试验所需要的大地参考坐标系并不一致,所以必须在正式试验之前测量得到模型在静水中处于平衡位置时的运动数据,作为坐标转换的参考,在数据处理过程中将正式试验采集得到的六自由度运动数据进行相应的参考坐标系转换计算,以形成最终的运动数据信号进行进一步的分析。

## 7.2 时域统计分析

模型在不规则海况下进行试验所得到的各项测量数据,经过误差分析和数据处理并按相似理论换算后,得到了实体相应的各项数据的时历曲线,这是具有各态历经性的平稳随机过程,对此可进行试验所需要的数据分析。

海洋工程模型试验研究中,通常有两种不同的方法进行数据分析,一种是在时间域内对采样数据(测量记录数据)进行分析,称为时域统计分析;另一种是对采样数据在频域范围内的谱分析,结合 Rayleigh 分布的理论结果进行谱特性的分析,称为频域分析。本节介绍时域统计分析方法。

## 7.2.1 统计特性

对于具有各态历经性的平稳随机过程  $\xi(t)$ ,  $t=0 \rightarrow T$ , 其最基本的统计特性包括: 最大值、最小值、平均值和标准差(均方差)。其中, 最大值、最小值的定义是显而易见的, 是指在所有的测量数据中数值最大、最小的那个数据, 可从对时历数据进行的大小排序中确定。平均值和标准差(均方差)的定义分别为:

$$\begin{aligned} \text{平均值} \quad \bar{\xi} &= \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) dt \\ \text{或} \quad \bar{\xi} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi(t_i) \end{aligned} \quad (7-1)$$

$$\begin{aligned} \text{标准差} \quad \sigma &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\xi(t) - \bar{\xi}]^2 dt} \\ \text{或} \quad \sigma &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\xi(t_i) - \bar{\xi}]^2} \end{aligned} \quad (7-2)$$

式中:  $\xi(t)$  是试验测量的某一物理量(波浪或运动或受力);  $t=0$  是试验记录的起始时间;  $t=T$  是试验记录的终止时间;  $N$  是试验记录的数据数目。

在海洋工程模型试验数据的统计分析中, 除上述最大值、最小值、平均值和均方差之外, 实际需要的统计特性往往还包括平均过零周期、有义单幅值和有义双幅值(三一值)、十一值、百一值等, 这些统计值有时称为高级统计特性。为便于说明问题起见, 选取随机过程  $\xi(t)$  的一段时历曲线, 如图 7-4 所示。

在图 7-4 中的  $t_i$  时刻, 曲线上行经过平均线, 称为向上过零一次。之所以称为“过零”, 是因为在实际数据分析时, 总是先把平均值扣除, 使得平均线统一到零线。从图 7-4 中还可以看到, 在  $t_{i+1}$  时刻发生了又一次向上过零, 这相邻两次的向上过零之间, 便称为一个过零周期, 若以  $T_i$  表示这个过零周期, 则  $T_i = t_{i+1} - t_i$ 。在这个过零周期中, 我们总能找到一个最大值和一个最小值, 分别称为峰值和谷值, 并以  $\xi_{Ai}^+$  和  $\xi_{Ai}^-$  表示。峰值和谷值都是单幅值, 两者之差(从谷值到峰值之间的垂向距离)称为双幅值, 若以  $\xi_{Di}$  表示, 则  $\xi_{Di} = \xi_{Ai}^+ - \xi_{Ai}^-$ 。

对于  $t=0 \rightarrow T$  的整条  $\xi(t)$  的时历记录曲线而言, 必然会有许多如上所述的过零周期。如果总的过零周期数有  $M$  个, 则同时必然也有  $M$  个峰值、谷值和双幅值。所谓平均过零周期  $\bar{T}_0$ , 是指这  $M$  个过零周期的平均值, 可简便地按下式求得:

$$\bar{T}_0 = \sum_{i=1}^M \frac{T_i}{M} \quad (7-3)$$

类似地, 取  $M$  个峰值、谷值和双幅值的平均值, 即可得到平均峰值、谷值和双幅值; 取  $M$  个过零周期、双幅值中的最大值, 即为最大过零周期、最大双幅值。所谓有义峰值、有义谷值、有

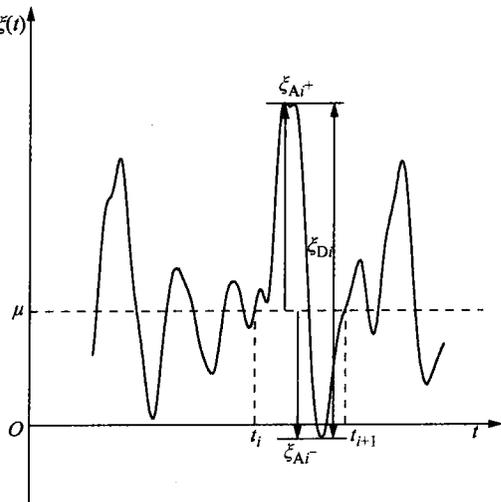


图 7-4 随机过程的一段时历曲线

义双幅值,是指对所有  $M$  个峰值、谷值和双幅值,按绝对值从大到小按序排列,对三分之一数目的最大幅值平均,便得有义值或三—值。如对十分之一(或百分之一)数目的最大幅值平均,相应地可得到十一值(或百—值)的统计特征数值。类似地,计算  $M$  个过零周期的三—值,即称为有义(三—)过零周期。

可见,这样组合形成的高级统计特性的概念是很多的,没有必要全部作为分析结果放入试验报告中。只要根据试验任务书中的规定,将试验委托单位所关心的那些统计特性进行计算分析,并作为结果列表给出即可。

### 7.2.2 极值概率分布图(Weibull 分布图)

在海洋工程模型试验研究中,通常都假定波浪以及由波浪引起浮体运动和受力等瞬时值服从正态分布,其幅值(或包络)服从 Rayleigh 分布,因而 Rayleigh 分布在目前海洋工程的有关分析研究中得到了广泛的运用。但是,海上的实际风浪及其波谱只是近似地符合正态分布的假定,因而由 Rayleigh 分布给出的幅值特性与实际有一定差异。20 世纪 70 年代中期以后,有些研究者所得的分析结果表明,由 Rayleigh 分布给出的不小于某一给定幅值的概率偏大,特别是对于小的概率,这种差异更为明显。而在海洋工程的实际问题中,人们最为关心的正是这种小概率所对应的幅值。因此 Forristall 在其后提出了不小于某一给定幅值的概率分布  $F_1(x)$ (称为超过概率)用 Weibull 分布拟合较为恰当,这种方法在海洋工程模型试验研究的幅值统计分析中得到了普遍的应用。

符合 Weibull 分布的超过概率分布函数  $F_1(x)$  的表达式为

$$F_1(x) = \exp\left[-A\left(\frac{x}{x_0}\right)^B\right] \quad (7-4)$$

式中: $x_0$  为整个试验记录时历曲线中的最大幅值; $x$  为某一给定的幅值; $A$ 、 $B$  是形式参数,由试验数据的分析拟合求得。在  $B=2$  时,上式即为 Rayleigh 分布。

如果用累积概率  $F(x)=1-F_1(x)$  来表示,则为:

$$1-F(x) = \exp\left(-A\left(\frac{x}{x_0}\right)^B\right) \quad (7-5)$$

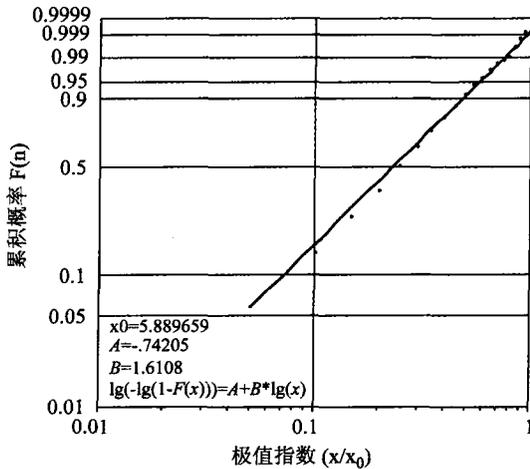


图 7-5 Weibull 分布图

对上式两次取自然对数,可以写作下列变换式:

$$\ln\{-\ln[1-F(x)]\} = A + B \ln\left(\frac{x}{x_0}\right) \quad (7-6)$$

利用专门的 Weibull 概率格子坐标系,即可按上式绘制成直线形式的 Weibull 分布如图 7-5 所示。

图中:离散点代表实际的测量值,直线是拟合的 Weibull 分布线;横坐标为关于幅值比的自然对数  $\ln\left(\frac{x}{x_0}\right)$ ;纵坐标为关于累积概率的双自然对数  $\ln\{-\ln[1-F(x)]\}$ 。绘制方法比较简便,例如整条时历曲线中有  $M$  个过零周期,其中最大的幅值  $x_0$  只有一个,其

概率为 $\frac{1}{M}$ ,对于某一给定幅值 $x$ ,如果有 $N$ 个不小于 $x$ 的幅值,则其超过概率为 $F_1(x) = \frac{N}{M}$ 或累积概率 $F(x) = 1 - \frac{N}{M}$ 。

理论上,如果幅值分布完全符合 Weibull 分布,那么 Weibull 分布图中的累积概率函数应为一 条直线。然而,实际海上和模型试验中的不规则波及浮体运动和受力等响应的幅值分布并不完全符合 Weibull 分布,因此,Weibull 分布图中累积概率函数的测量值并不正好成一条直线。为了获得理论上所认为的符合 Weibull 分布的极值概率分布函数,往往将这些试验测量值进行直线拟合,近似获得 Weibull 分布函数式(7-4)~(7-6)中的系数 $A$ 和 $B$ 。在图 7-5 的实例中,根据拟合的 Weibull 分布直线得到: $A = -0.74205, B = 1.6108$ 。

在实际试验数据的分析时,对各种测得的物理量(波浪、物体运动和受力等)根据需要都可以绘制成峰值、谷值和双幅值的 Weibull 分布图。一般地,对于试验中模拟的不规则波,需要同时提供峰值、谷值和双幅值的 Weibull 分布图;对于其他的动力响应等数据,往往只需要提供由峰值和谷值的绝对值组成的单幅值的 Weibull 分布图。

### 7.3 频域谱分析

上节中介绍的统计分析方法,是在时域范围内对试验中测量所得的各项物理量的时历过程进行分析。谱分析方法则是对随机过程在频域范围内进行分析,用以研究和预报系统的动力响应。

#### 7.3.1 功率谱密度函数曲线图

谱分析的主要目的是要得到功率谱密度函数。为此需要将测量得到的时历过程 $\xi(t)$ 通过 Fourier 变换转换到频域形式的复函数 $Z(\omega)$ ,采用的 Fourier 变换的表达式是:

$$Z(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(t) e^{-j\omega t} dt \quad (7-7)$$

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{\infty} Z(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (7-8)$$

式中: $j$ 为虚数; $\omega$ 为圆频率。在实际分析中通常都是采用离散形式,其表达式为:

$$Z(\omega) = \frac{\Delta t}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \xi(i) e^{-j\omega(i\Delta t)}, \quad -\infty < \omega < \infty \quad (7-9)$$

实部和虚部分开的形式可写作:

$$Z(\omega) = C(\omega) - jQ(\omega) \quad (7-10)$$

式中:

$$C(\omega) = \frac{\Delta t}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \xi(i) \cos(\omega i \Delta t) \quad (7-11)$$

$$Q(\omega) = \frac{\Delta t}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \xi(i) \sin(\omega i \Delta t) \quad (7-12)$$

根据上述 Fourier 变换得到的复函数 $Z(\omega)$ ,可计算得到功率谱密度函数 $S(\omega)$ :

$$S(\omega) = C^2(\omega) + Q^2(\omega) \quad (7-13)$$

根据试验测量得到的时历过程曲线,进行 Fourier 变换,计算得到对应若干不同频率的  $C(\omega)$ 、 $Q(\omega)$  及  $S(\omega)$  值,便可以绘制功率谱密度曲线,如图 7-6 所示。该图是不规则波的谱密度曲线,图中实线是对试验测量波浪进行谱分析得到的结果,离散点是试验要求达到的理论波谱(称为目标谱)。对于试验中测量得到的其他物理量,如物体运动及受力等,都可以进行谱分析而得出相应的功率谱密度函数曲线,但不存在像波谱那样有给定的目标谱。

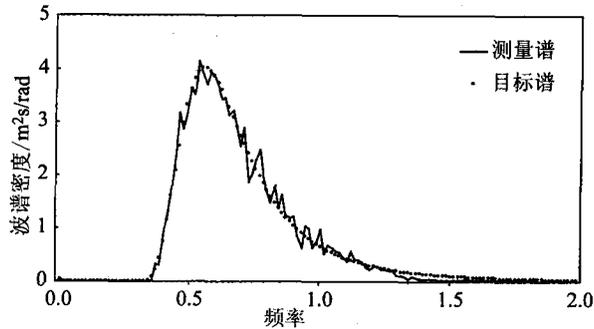


图 7-6 功率谱密度函数曲线

### 7.3.2 谱特征值

有了谱密度函数的分布曲线,可以进行有关的特性分析,并得出对浮式海洋平台具有许多重要实际意义的统计结果。谱密度函数曲线有如下一些重要的特征值。

#### 1. $n$ 阶谱矩 $m_n$

谱密度函数曲线对原点的  $n$  阶矩,代表了能量(功率)谱密度对原点的分布情况,数学表达式为:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7-14)$$

当  $n=0$  时,上式写为:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \sigma^2 \quad (7-15)$$

式(7-15)所表示的零阶矩代表谱密度函数曲线下的面积,也代表均方差  $\sigma^2$ 。因此,计算谱密度函数曲线对原点的零阶矩,即可计算得到均方差的值。对于不规则波及浮式海洋平台系统的动力响应而言,这是最为重要的一个参数。根据均方差,可以计算得到实际所关心的许多重要的极值参数。

理论上假定不规则波以及由此引起的浮体运动和受力等的动力响应的幅值基本上服从 Rayleigh 分布,按照 Rayleigh 分布的理论分析结果,可以计算实际所关心的  $1/n$  最大幅值的期望值,计算式为:

$$\text{平均幅值}(n=1), \quad \overline{\xi_A} = 1.25\sigma$$

$$\text{三一有义幅值}(n=3), \quad \overline{\xi_{A/3}} = 2.00\sigma$$

$$\text{十一平均幅值}(n=10), \quad \overline{\xi_{A/10}} = 2.55\sigma$$

$$\text{百一平均幅值}(n=100), \quad \overline{\xi_{A/100}} = 3.22\sigma$$

上述所得的  $1/n$  最大幅值的期望值,从理论上而言,应该和第 7.2 节中对时历曲线进行时

域统计分析的结果基本一致,因而两者有相互校核的作用。

## 2. 谱宽参数

谱宽参数  $\epsilon$  表征谱密度分布的宽窄范围,其定义为:

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (7-16)$$

当  $\epsilon=0$  或接近 0 时,谱的能量相对集中,谱密度曲线窄而高,谱密度分布在很窄的频率范围内,有明显的主频率,称为窄带谱。当  $\epsilon=1$  或接近于 1 时,谱密度曲线宽而低,即谱密度分布在很宽的频率范围内,称为宽带谱。

实际的谱宽参数  $\epsilon$  总是介于 0 和 1 之间。为了在具体分析中应用 Rayleigh 分布( $\epsilon=0$ )的理论结果,可采用下式对标准差进行修正,即:

$$\sigma_1 = \sqrt{1 - \frac{1}{2}\epsilon^2} \sigma \quad (7-17)$$

当  $\epsilon < 0.4$  时,通常可不考虑谱宽的影响。海洋平台所遭遇的不规则波及其运动和受力基本上都属于窄带谱范畴,通常直接应用 Rayleigh 分布的理论结果进行数据分析。

## 3. 平均过零周期与特征周期

不规则波以及浮体运动和受力等动力响应的过零周期都是随机的,在所记录的时间历程中,过零周期大小不一。根据谱分析的结果,可以得出平均过零周期  $\overline{T_0}$  为:

$$\overline{T_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (7-18)$$

在不规则波浪的谱分析中,有时还用到特征周期(也称为平均波浪周期或谱形心周期)的概念。根据谱分析的结果,可以得出特征周期  $T_1$  为:

$$T_1 = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad (7-19)$$

## 7.4 交叉谱分析

在第 3.6 节中,我们曾讨论过线性系统输入与输出的响应问题,并且给出了频率响应函数  $H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{Y_0}{X_0} e^{j\delta}$  的表达式,其中  $\frac{Y_0}{X_0} = |H(j\omega)|$  是输出对输入的幅频特性,  $|H(j\omega)|^2$  是响应幅值算子(RAO),  $\delta = \arg[H(j\omega)]$  是输出对输入的相位差,称为相频特性或相位响应函数。

当船模或海洋平台模型在不规则波中进行试验后,一般都要进行谱分析,以便得到有关的谱密度函数曲线及谱特征值。此外还要进行交叉谱分析(也称相关分析),其目的在于得到系统的频率响应函数,这是系统本身一个非常重要的特性,而且与输入无关。因此只要知道系统的频率响应函数,就可以预报在选取的任意海况下,系统的运动和受力等有关特性。根据线性系统的假定,输入的单变量是波浪,记作  $x$ ,其代表则为波浪谱密度函数  $S_x(\omega)$ ;输出的单变量是响应(运动或受力),记作  $y$ ,其代表则为响应谱密度函数  $S_y(\omega)$ 。如将交叉谱密度函数记作  $S_{xy}(\omega)$ ,响应函数记作  $H(j\omega)$ ,相关函数记作  $\gamma_{xy}(\omega)$ ,则根据理论分析及有关定义,它们之间存在下列关系:

$$S_y(\omega) = |H(j\omega)|^2 S_x(\omega) \quad (7-20)$$

$$S_{xy}(\omega) = H(j\omega)S_x(\omega) \quad (7-21)$$

$$\gamma_{xy}(\omega) = \sqrt{\frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_x(\omega)S_y(\omega)}} \quad (7-22)$$

由于  $|S_{xy}(\omega)|^2 \leq S_x(\omega)S_y(\omega)$ , 即  $|H(j\omega)S_x(\omega)|^2 \leq |H(j\omega)|^2 S_x^2(\omega)$ , 因而相关函数  $\gamma_{xy}(\omega)$  的大小在 0 与 1 之间, 即  $0 \leq \gamma_{xy}(\omega) \leq 1$ ,  $\gamma_{xy}(\omega)$  的数值越大, 表示响应与输入的联系越紧密。

在进行交叉谱的相关分析时, 输入的谱密度是给定的波谱  $S_x(\omega)$ 。必须注意: 这里使用的波谱  $S_x(\omega)$  是指在水池中模拟不规则波时实际测量所得的波谱 (即测量波谱), 而不是任务书中所规定的理论波谱 (即目标谱)。输出的单变量响应 (运动或受力) 的谱密度函数  $S_y(\omega)$  是根据试验中测量的响应时历曲线分析所得。有了响应和输入的谱密度函数  $S_y(\omega)$  和  $S_x(\omega)$  后, 就可以计算出频率的响应函数  $H(j\omega)$  和交叉谱密度函数  $S_{xy}(\omega)$ 。由于响应函数是以复数形式来表示的, 因而在实际分析中一般给出的是响应幅值算子 RAO 和相位响应函数 (相位差  $\delta(\omega)$ ), 分析计算的表达式为:

$$\text{幅值算子 RAO: } |H(j\omega)|^2 = \frac{S_y(\omega)}{S_x(\omega)} \quad (7-23)$$

$$\text{相频特性 } \delta: \phi_{xy}(\omega) = -\frac{180}{\pi} \tan^{-1} \frac{Q_{xy}(\omega)}{C_{xy}(\omega)} \quad (7-24)$$

$$\text{其中 } S_{xy} = C_{xy}^2(\omega) + Q_{xy}^2(\omega) \quad (7-25)$$

图 7-7、图 7-8、图 7-9 分别给出了上海交大海洋工程水池对某一单变量响应 (纵摇运动) 幅值响应函数、相位响应函数及相关函数分析结果的实例。

上面介绍的是单变量响应交叉谱的分析结果。海洋工程模型在不规则波中试验对需要测

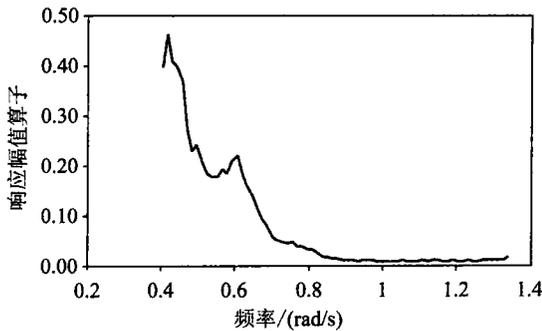


图 7-7 幅值响应函数曲线

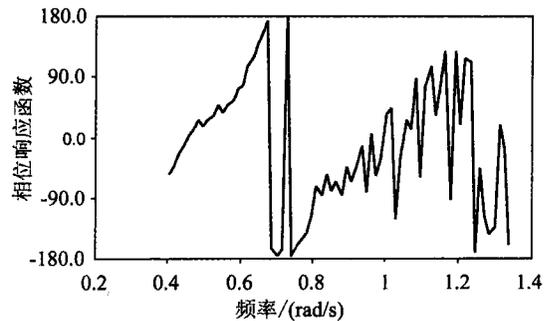


图 7-8 相位响应函数曲线

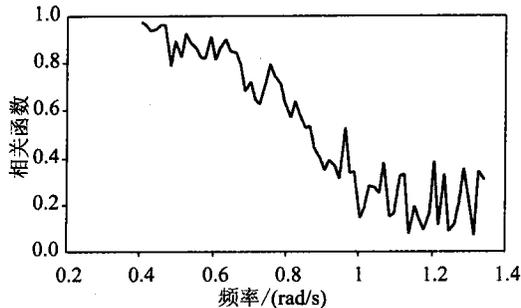


图 7-9 相关函数曲线

量运动及受力等众多单变量数据,都可一一进行交叉谱分析,从而得出各项运动及受力等的幅值响应函数、相位响应函数和相关函数的分析结果。但是在实际的试验数据分析中,往往只对几个重要的测量项目进行交叉谱分析,以避免研究报告中掺杂过多无关紧要的图表。例如采用散布式系泊系统的浮式海洋平台,其锚泊线常有10根以上,虽然在试验中测量了各根锚泊线的受力,但只需对几根针对风浪方向受力很大的锚泊线进行交叉谱分析即可,因为其余的锚泊线受力很小,甚至处于松弛状态。

## 7.5 规则波试验数据分析

上述时域统计分析、谱分析和交叉谱分析是针对不规则波试验的测量数据所进行的,对于规则波试验而言,这些分析所获得的结果一般没有什么实际意义,必须根据规则波试验的目的进行特殊形式的分析。

在规则波中的试验主要是为了获得平台在波浪作用下运动和受力的频率响应函数,包括幅值响应算子RAO以及相应的相位响应函数,以校验和分析不规则波中的试验结果,分析非线性性的影响。规则波中的模型试验还可以用于确定波浪慢漂力和力矩系数。在线性理论的假定下,根据规则波中的试验结果,通过计算分析可以预报任意海况下浮式海洋平台在不规则波中的水动力性能。

根据国际船舶试验池会议(ITTC)的规定,规则波试验中所采集的数据应不少于10个完整的波浪周期数据。在数据分析中,应选取信号较为平稳的一段,对数据进行时域统计分析,即可得到波浪、平台运动以及受力等有关信号的平均值、平均双幅值、平均过零周期等统计值。根据时域统计结果,将平台六自由度运动与受力的平均双幅值和相位与波浪统计值相比较,即可分别得到平台在不同周期的规则波试验中,其运动与受力等的幅值响应算子RAO以及相关的相位响应函数。将不同波浪频率作为横轴,幅值响应算子与相位响应函数为纵轴,即可得到平台模型的幅值响应算子RAO曲线以及相位响应函数曲线。

此外,将平台总的系泊载荷的平均值与波高的平方相除,即可得到平台平均波浪漂移力的二次传递系数,即:

$$\alpha = \frac{F_{\text{diff}}}{H^2} \quad (7-26)$$

图7-10所示为某浮式平台规则波试验的纵荡运动试验结果(离散点)与白噪声

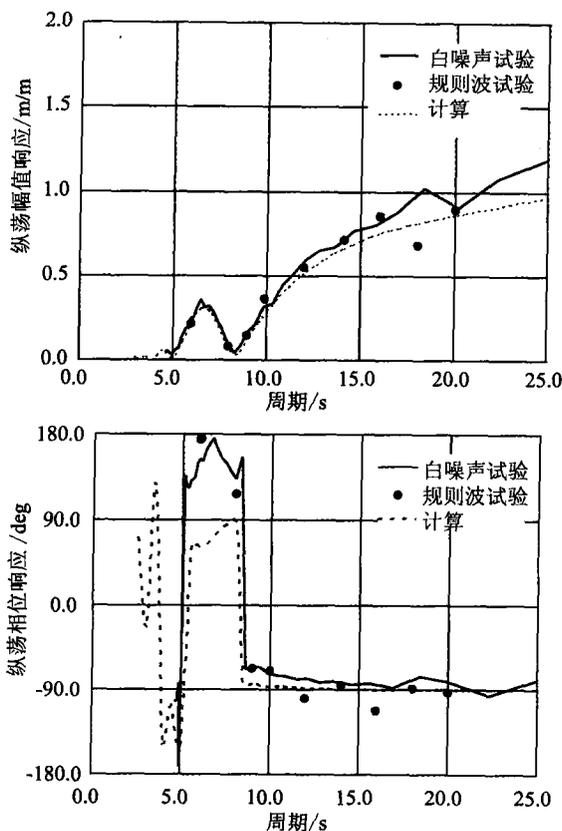


图7-10 规则波试验结果的比较

试验结果(实线)、理论结果(虚线)的比较情况。

## 7.6 海洋工程水池试验数据处理与分析软件

模型在不规则波浪中试验所需要测量的各项数据众多,记录通道常在数十个以上,每一通道采集的数据达数十万个,因而对试验采集数据的处理与分析,都是靠专门开发的计算机软件来自动完成。一般来说,软件应该具有下列各项功能。

- (1) 测量信号时历的多通道图形化显示。
- (2) 低通或高通滤波、光顺、消除异常坏点、信号缩放与增减等多种预处理计算及图形化对比显示与数据替换。
- (3) 数据通道的组合计算与替换。
- (4) 处理后试验数据的保存,可存为 ASCII 码文件格式或类似于采集文件的二进制文件格式。
- (5) 衰减试验的数据分析。
- (6) 规则波试验的数据分析。
- (7) 风浪环境条件(不规则波、非定常风)的统计分析、谱分析。
- (8) 测量数据的高低频分离。
- (9) 运动与受力等各种响应的全频、低频和高频信号的统计分析、谱分析和交叉谱分析。
- (10) 数据分析结果的各种报表、图表的输出。
- (11) 分析图表的批量打印。

为使读者具有直观实际的概念,这里简略给出了上海交通大学海洋工程水池试验数据处理与分析软件的几个主要操作界面,包括:

图 7-11 为时域统计结果的显示界面。

CHANNEL	NAME	DIMENSION	MAX	MIN	MEAN	SD
11	T.Fx	kg	-0.2369	-1.0360	-0.5951	0.1145
12	T.Fy	kg	0.1348	-0.2723	-0.0638	0.0679
13	T.Fz	kg	0.0453	-0.0745	-0.0161	0.0212
16	Y.Yaw	deg	5.9291	-7.1774	0.0544	2.5236
17	F.cross1	kg	0.4660	0.0770	0.1753	0.0405
18	F.cross2	kg	0.1631	-0.1306	-0.0455	0.0289
19	F.cross3	kg	0.2991	0.0799	0.1721	0.0265
20	F.cross4	kg	0.0434	-0.1093	-0.0530	0.0181
21	F.cross5	kg	0.0814	-0.1108	-0.0244	0.0280
22	F.cross6	kg	0.2362	0.0729	0.1372	0.0182
23	F.cross7	kg	0.3788	-0.1072	-0.0062	0.0403
24	F.cross8	kg	0.3435	0.0421	0.0977	0.0303
25	F.line	kg	0.3135	0.0392	0.1419	0.0569
31	wave(X)	cm	3.4789	-3.4612	0.0146	0.7870
32	wave(Y)	cm	4.0312	-3.4307	0.0520	1.0126
40	T.B	V	2.4813	-2.5640	-0.0185	0.6439

图 7-11 时域统计值显示界面

- 图 7-12 为组合显示多个测量数据时历曲线的界面。
- 图 7-13 为数据处理与对比显示的操作界面。
- 图 7-14 为数据分析的操作界面。
- 图 7-15 为数据分析图表输出与打印的界面。

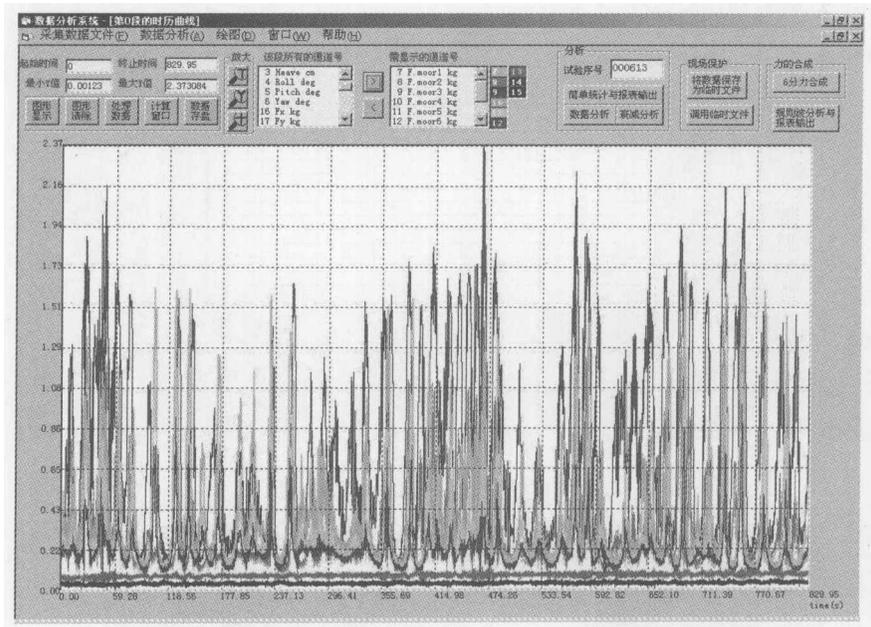


图 7-12 组合显示多个测量数据时历曲线的界面

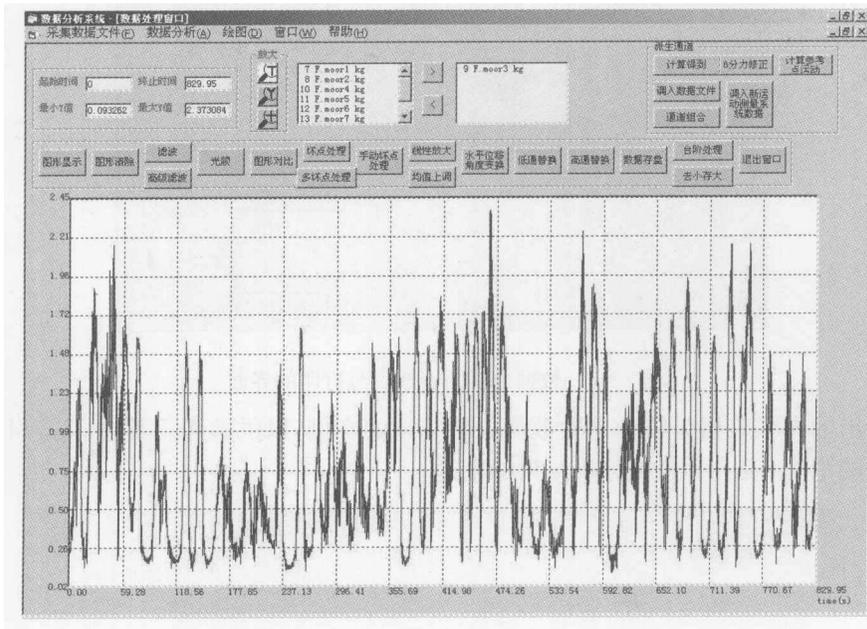


图 7-13 数据处理与对比显示的操作界面

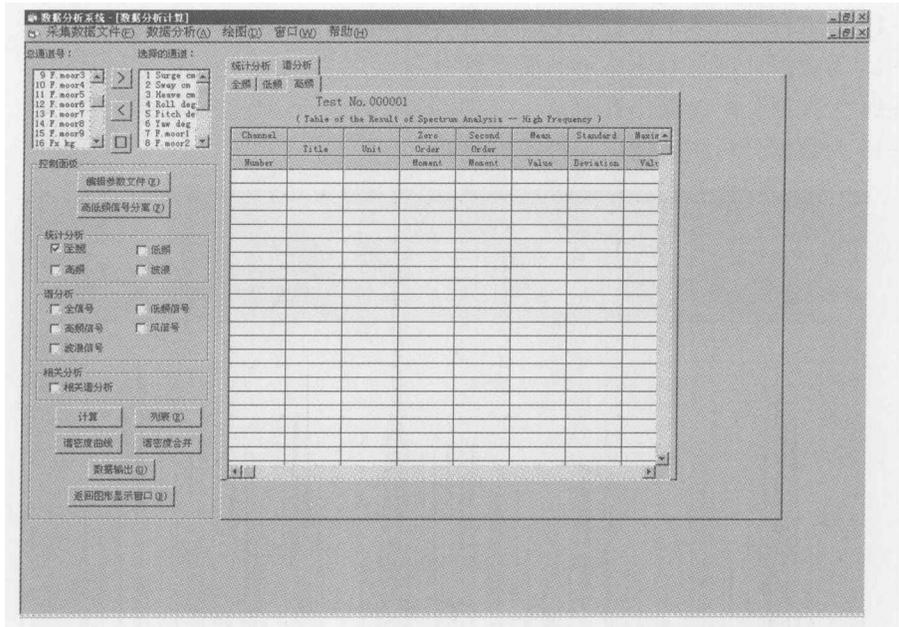


图 7-14 数据分析的操作界面

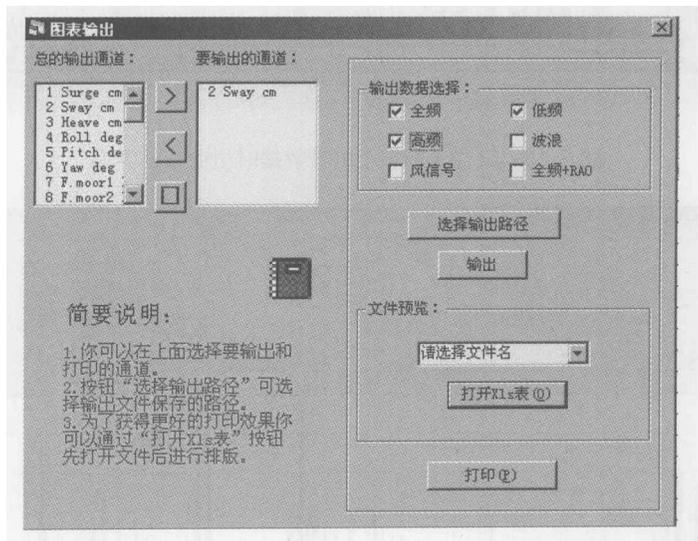


图 7-15 数据分析图表输出与打印的界面

下面给出的两张表格是模型试验数据分析结果的实例,以供参考。其中,表 7-1 是时域统计分析结果的汇总,表 7-2 是谱分析结果的汇总。

表 7-1 试验数据时域统计分析结果

channel number	title	unit	number of zero upcrossings	maximum value	minimum value	mean value	standard deviation	maximum double amplitude	sign. positive amplitude	sign. negative amplitude	mean zero cro.	Estimated 3.0hr maximum	Estimated 3.0hr minimum
1	WaveCal	m	1264	5.791	-4.832	0.005	1.327	9.793	5.123	2.854	-2.468	8.723	-4.534
2	wave(Re)	m	1298	10.52	-7.82	0.366	2.355	16.79	9.09	5.053	-4.455	8.494	-7.378
3	wave(E)	m	1256	4.774	-3.921	0.047	1.237	8.158	4.748	2.561	-2.368	8.775	-3.909
4	wave(N)	m	1263	5.56	-5.289	0.09	1.445	10.32	5.575	3.062	-2.73	8.727	-5.034
5	wind	m/s	135	31.83	17.1	23.82	2.315	11.73	6.262	4.076	-3.624	81.14	31.54
6	surge	m	127	4.214	-8.602	-2.123	2.047	12.82	6.905	3.649	-3.618	87.05	3.681
7	sway	m	210	7.561	-3.214	2.652	1.843	9.766	4.233	2.491	-2.475	52.64	7.685
8	heave	m	1126	3.38	-2.252	0.0	0.648	5.511	2.435	1.295	-1.285	9.799	2.952
9	roll	deg	1000	1.772	-1.826	0.0	0.451	3.598	1.767	0.898	-0.913	11.03	1.672
10	pitch	deg	1177	1.325	-1.396	0.0	0.277	2.721	1.083	0.552	-0.58	9.364	1.176
11	yaw	deg	353	9.009	4.03	6.579	0.782	2.761	1.055	0.587	-0.641	30.62	9.194
12	T.Fx	MT	90	344.5	-600.9	-184.5	143.4	945.4	544.3	288.6	-265.9	123.0	283.4
13	T.Fy	MT	223	185.8	15.31	98.16	26.92	155.3	65.93	42.87	-33.31	49.43	188.9
14	T.Fz	MT	130	-85.72	-374.4	-251.2	43.26	288.7	157.0	83.5	-80.64	85.0	-102.6
15	T.Mx	MT.m	283	606.0	-1123.0	-373.9	260.8	1569.0	576.5	352.7	-349.0	38.21	602.1
16	T.My	MT.m	179	3452.0	-4954.0	-1147.0	1271.0	8406.0	3772.0	2209.0	-2006.0	61.59	3083.0
17	L.Fx	MT	133	215.3	-242.0	-15.02	68.41	428.9	224.7	117.5	-122.7	83.09	195.6
18	R.Fx	MT	140	391.1	-176.1	157.2	82.73	567.2	268.2	143.4	-150.3	79.33	385.1
19	L.Fy	MT	676	41.63	-125.0	-43.2	22.31	134.3	69.48	42.71	-42.31	16.31	39.66
20	R.Fy	MT	473	32.41	-154.4	-60.91	27.47	173.1	72.28	44.96	-45.78	23.33	28.86
21	L.Fz	MT	589	-659.2	-871.6	-762.4	31.66	166.1	85.13	49.57	-57.37	18.75	-659.4
22	R.Fz	MT	579	-626.7	-842.1	-712.0	28.78	177.0	76.03	46.71	-51.59	19.07	-628.2
23	P.LF	MT	512	778.3	561.9	642.4	30.98	173.9	76.64	52.82	-45.05	21.53	774.7
24	P.RF	MT	954	728.8	552.6	607.6	17.36	137.2	56.11	30.33	-31.76	11.56	708.5
25	Y.roll	deg	219	5.976	-1.798	1.477	1.221	7.465	3.368	2.084	-2.065	50.37	5.628
26	Y.pitch	deg	877	-13.83	-21.66	-17.95	1.041	5.981	3.717	2.001	-2.041	12.58	-13.52
27	Y.yaw	deg	243	5.789	-10.12	-3.116	2.471	13.08	5.689	3.457	-3.425	45.43	6.603
28	Acc.Ax1	m/s <sup>2</sup>	1177	0.25	-0.281	-0.002	0.072	0.502	0.28	0.143	-0.145	9.374	0.255
29	Acc.Ay1	m/s <sup>2</sup>	1012	0.663	-0.572	-0.001	0.137	1.219	0.534	0.274	-0.274	10.89	0.585
30	Acc.Az1	m/s <sup>2</sup>	1090	0.767	-0.806	-0.001	0.221	1.485	0.86	0.432	-0.444	10.12	0.783
31	FSO.xy	m	171	9.591	0.043	3.935	1.908	9.381	5.878	3.38	-3.201	64.66	9.55
32	P.Fx	MT	103	569.1	-364.1	142.2	145.0	933.3	526.8	274.4	-272.7	107.3	553.5
33	P.Fy	MT	560	63.77	-276.8	-104.1	49.21	325.4	141.5	88.1	-89.53	19.7	69.3

表 7-2 试验数据谱分析结果

channel number	title	unit	zero order moment	second order moment	mean value	standard deviation	sign. double amplitude	zero crossing period	charact. period	spectrum peak frequency	spectrum peak period	peak value of spectrum
1	WaveCal	m	1.76	0.9614	0.007	1.326	5.305	8.499	8.877	0.6204	10.13	8.083
2	wave(Re)	m	5.537	3.16	0.384	2.353	9.412	8.317	8.724	0.5677	11.07	28.28
3	wave(E)	m	1.546	0.8054	0.047	1.243	4.973	8.704	9.089	0.5752	10.92	9.801
4	wave(N)	m	2.093	1.138	0.089	1.447	5.787	8.521	8.873	0.6128	10.25	16.19
5	wind	m/s	5.444	0.03399	23.86	2.333	9.333	79.52	147.0	0.00282	2225.0	81.74
6	surge	m	4.563	0.02986	-2.125	2.136	8.544	77.67	141.2	0.04048	155.2	490.6
7	sway	m	3.498	0.04893	2.578	1.87	7.481	53.13	131.7	0.04048	155.2	209.8
8	heave	m	0.4212	0.1811	0.0	0.649	2.596	9.583	10.71	0.5677	11.07	3.39
9	roll	deg	0.2057	0.06743	0.0	0.454	1.814	10.97	11.98	0.4547	13.82	3.505
10	pitch	deg	0.07717	0.0379	0.0	0.278	1.111	8.966	9.93	0.5677	11.07	0.6229
11	yaw	deg	0.5262	0.02182	6.564	0.725	2.902	30.86	121.7	0.04048	155.2	16.4
12	T.Fx	MT	2.235E+4	106.7	-184.4	149.5	598.0	90.93	148.1	0.04048	155.2	2.391E+6
13	T.Fy	MT	732.4	12.53	97.71	27.06	108.2	48.03	111.8	0.04048	155.2	5.146E+4
14	T.Fz	MT	2030.0	22.65	-251.1	45.06	180.2	59.49	121.1	0.04048	155.2	2.122E+5
15	T.Mx	MT.m	6.852E+4	2055.0	-364.1	261.8	1047.0	36.28	86.4	0.04048	155.2	3.445E+6
16	T.My	MT.m	1.753E+6	2.439E+4	-1146.0	1324.0	5295.0	53.26	119.2	0.04048	155.2	1.841E+8
17	L.Fx	MT	5050.0	40.11	-14.29	71.07	284.3	70.51	135.6	0.04048	155.2	4.655E+5
18	R.Fx	MT	7443.0	58.48	156.4	86.27	345.1	70.88	131.0	0.04048	155.2	7.906E+5
19	L.Fy	MT	522.2	95.69	-43.11	22.85	91.4	14.68	14.68	0.04048	155.2	3.301E+4
20	R.Fy	MT	801.2	75.15	-60.62	28.31	113.2	20.52	39.01	0.04048	155.2	6.348E+4
21	L.Fz	MT	1061.0	126.6	-762.3	32.57	130.3	18.18	29.97	0.04048	155.2	7.266E+4
22	R.Fz	MT	879.9	104.7	-712.5	29.66	118.7	18.22	30.39	0.04048	155.2	6.529E+4
23	P.LF	MT	1020.0	89.67	642.5	31.94	127.8	21.19	38.74	0.04048	155.2	7.542E+4
24	P.RF	MT	308.8	77.25	608.2	17.57	70.29	12.56	16.04	0.07814	80.41	4808.0
25	Y.roll	deg	1.601	0.03557	1.481	1.265	5.061	42.15	81.16	0.04048	155.2	155.7
26	Y.pitch	deg	1.102	0.2635	-17.95	1.05	4.2	12.85	14.45	0.04048	155.2	22.43
27	Y.yaw	deg	6.287	0.1548	-3.014	2.507	10.03	40.05	95.57	0.04048	155.2	381.8
28	Acc.Ax1	m/s <sup>2</sup>	5.204E-3	2.4E-3	-0.002	0.072	0.289	9.253	9.93	0.5677	11.07	0.04841
29	Acc.Ay1	m/s <sup>2</sup>	0.01886	6.24E-3	-0.001	0.137	0.549	10.92	11.63	0.4547	13.82	0.2542
30	Acc.Az1	m/s <sup>2</sup>	0.04871	0.01871	0.0	0.221	0.883	10.14	10.47	0.5677	11.07	0.6503
31	FSO.xy	m	3.889	0.0471	3.925	1.972	7.888	57.1	120.5	0.04048	155.2	364.5
32	P.Fx	MT	2.287E+4	129.2	142.1	151.2	604.9	83.6	140.5	0.04048	155.2	2.422E+6
33	P.Fy	MT	2558.0	337.2	-103.7	50.58	202.3	17.31	29.19	0.04048	155.2	1.875E+5

# 第 8 章 试验研究项目的实施规程

## 8.1 项目实施流程图

各类海洋平台模型试验研究的目的和内容虽然各有侧重,但其实施规程基本类似。本章就试验研究项目的实施在总体上作一概括的介绍。

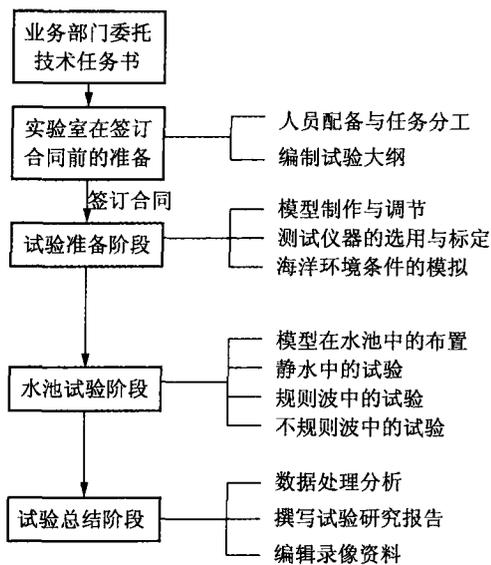


图 8-1 试验研究项目的实施流程

海洋工程模型试验研究涉及的范围与测试内容较多,需要有一个周密的实施规程,以保证工作的顺利进行。业务部门委托给实验室模型试验项目的技术任务书是编制实施规程的依据。实验室获得任务书后,在仔细分析其中各项内容要求的基础上,编制项目的试验大纲,与委托单位协商一致并正式签订合同和协议书。合同生效后实验室正式开始按任务书要求开展各项工作。通常分为三个阶段。第一阶段是试验准备阶段,主要进行模型的制作与调节、测试仪器的选用与标定、海洋环境条件的模拟;第二阶段是模型在水池中的试验阶段,主要进行模型在静水、规则波以及不规则波中的各项试验;第三阶段是试验的总结阶段,在数据处理与分析的基础上完成整个项目的试验研究报告。因此,一个试验研究项目的整个实施过程可概括为如图 8-1 所示的流程框图。

现对上述流程框图中的有关内容在以下章节中作进一步说明。

对以上流程框图中的有关内容在以下章节中作进一步说明。

## 8.2 技术任务书

无论是方案可行性研究或重大工程开发项目的研究,海洋石油开发部门或设计研究单位等(业主)在委托实验室进行模型试验研究时,都应出具明确详细的项目技术任务书(Model Test Specifications),并且尽量详细地给出试验所需的各种技术文件和资料。

不同委托单位所撰写的技术任务书的繁简程度各不相同,但通常都应该包括如下各项主要内容:

### 1) 引言

简单介绍试验研究的目的、主要内容和工程背景。

### 2) 试验模型

提供如下技术资料:

(1) 海洋平台主体的型式及主要设计图纸,主尺度、载况、排水量、重心位置、惯性半径、固有周期、受风面积等主要技术参数。

(2) 系泊系统的型式,锚泊线的组成、材质、几何尺寸、空气中重量、水中重量、主要力学特性参数,导缆孔的位置以及在海上的实际布置情况,预张力和水平跨距。如无系泊系统,则需提供在试验中的固定方式及要求。

(3) 立管系统的型式、组成、材质、空气中重量、水中重量、内容物、弯曲刚度,平台上的固定位置,以及在海上的实际布置情况、预张力等。

(4) 单根锚泊线以及整个系统的水平恢复力曲线。

以上内容应尽量提供相关设计图纸和详细技术参数,并指出制作模型时的误差范围要求,使得海洋工程水池可以顺利完成试验中所有模型的制作与模拟。

除提供上述技术资料外,还应提出模型制作与模拟的技术要求,包括:

(1) 模型缩尺比或缩尺比的范围。

(2) 按缩尺比制作的各种试验模型的精度要求。

(3) 模型制作完成后,主要技术参数的模拟精度要求。

3) 海洋环境条件

(1) 平台工作海域的水深。

(2) 波浪。对于不规则波,需给出采用的波谱、有义波高、谱峰周期;提出波浪模拟的时间长度,通常为对应实际 1~3h;给出波浪校验时的测试位置。对于规则波,需给出周期或波长范围,以及对波高的要求。对于白噪声波浪,需给出波浪周期的范围、波高。给出波浪模拟时的技术要求。

(3) 风。对于定常风,需给出风速、风向。对于非定向风,需给出平均风速、风谱、风向。给出风模拟时的技术要求。

(4) 流。对于均匀流,需给出流速、流向。对于剖面流,则给出流速随水深的垂向分布、流向。给出流模拟时的技术要求。

(5) 风、浪、流不同极值、不同方向的组合海况。

4) 试验内容

详细列出所有需要进行的试验内容,如静水衰减试验、风力和流力标定试验、锚泊线和系统水平刚度试验、规则波试验、不规则波试验等。给出每项试验中的平台载况、系统布置情况、海洋环境条件等,列出详细的试验工况表。对于验证性试验,还需要给出对试验误差范围的要求。

5) 测量数据

列出所有需要测量的物理量,通常包括:平台六自由度的运动、各重要位置处的加速度、各重要位置处的相对波面升高(气隙、甲板上浪或出水)、系泊系统的系泊力、立管的受力、波高、风速、流速、拍摄录像的位置(水上和水下)及录像机的数量。如有特殊要求,可增加所需的测量内容,如砰击压力等。

给出相关技术要求,如测量仪器的精度与静态标定、测量数据的采样频率等。

6) 数据分析

给出数据分析的内容,视具体情况,可能包括:高低频信号分离、时域统计分析、谱分析、相

关谱分析等。相应给出需要提供的最终数据分析结果,如统计分析需要给出平均值、标准差、最大值、最小值、过零值(过零周期、峰值、谷值和双幅值)等统计值,以及幅值的 Weibull 分布图;谱分析需要给出功率谱密度函数曲线,以及  $n$  阶矩、均方差、有义值、谱峰周期、谱峰值等谱特征值;相关谱分析需要给出 RAO 曲线、相位响应曲线、相关函数曲线。

数据分析的内容视项目的具体情况可多可少,对于一般的试验项目,通常只要求对试验数据进行时域统计分析,给出基本统计特性即可。

#### 7) 试验报告

给出初步试验报告、最终试验报告、数据报告、录像、照片、光盘等试验成果的要求和时间期限。给出拍照和录像的技术要求,指出最终试验报告至少应包括的内容,如:海洋工程水池及选用仪器的简介、测试仪器的标定结果、模型描述、海洋工程环境条件模拟描述及模拟结果、模型在静水中的试验结果、模型在风、浪、流作用下的试验结果与分析。

#### 8) 质量和进度要求

为了保证试验研究结果的正确可靠,对实际工程项目提供科学依据,委托单位指派工程技术人员与实验室协作,全程参与和了解试验项目各环节的有关工作,并严格控制质量要求。

需要得到委托单位认可后才能进行正式试验的内容有:

(1) 模型制作的精度,模型主体的重量、重心位置、惯量的调节结果,系泊系统和立管系统模型及其力学特性的模拟结果。

(2) 各类测量仪器的标定结果。

(3) 水深、风、浪、流的模拟结果。

(4) 静水衰减试验、水平刚度试验、风力和流力试验的结果。

委托单位代表对模型缩尺比的选定、各类测试仪器及其在模型上的布置、照相机及摄像机的位置、模型在水池中的总体布置、各类试验结果等项可以提出建议或了解实际情况。如果对试验过程和试验结果存在疑问,可提出质询,甚至要求实验室进行重复试验,通过数据对比考察测试结果的正确性、重复性和稳定性。

对整个试验研究项目的完成日期以及主要试验环节的工作进度可提出要求,例如:

(1) 模型制作以及调节模拟、测量仪器的标定、海洋环境条件模拟等项工作的完成日期。

(2) 模型在水池中的各项试验(静水、规则波及不规则波中的试验)的完成日期。

(3) 提交初步试验报告和最终试验报告等研究成果的日期。

### 8.3 总体安排与试验大纲编制

实验室在接到委托单位的试验研究项目技术任务书后,应对任务书进行分析后作出总体考虑,例如试验研究各项要求的内容,实验室各项设施(包括测量仪器)的功能能否满足试验要求,实验室现有的研究任务、特别是水池是否能按照委托单位要求的时间进行正式试验等。在确认可以按时、保质、保量地完成该项试验研究项目后,应编制相关技术文件,并进行报价和投标。如果试验委托单位认可,则双方再经友好协商签订项目合同,委托单位的技术任务书作为合同的附件,表示实验室必须按任务书规定的要求完成各项试验研究工作。

在合同生效后,实验室即正式开始各项准备工作。首先要对试验研究项目的人员配备和任务分工作出总体安排,并编制完成试验大纲。

### 1) 人员配备与任务分工

海洋工程模型试验研究的工作内容多,涉及专业范围广,需要操作使用的专业仪器设备多,而且非常昂贵和精密,因此需要多学科、多层次研究人员的协同配合才能顺利地完成任务。试验中的参与人员及其任务分工情况如下:

(1) 试验项目负责人 与委托单位协调、沟通和试验有关的各项工作,编制试验大纲、试验任务与时间安排,监控测试质量,撰写试验报告,提交成果和参加验收评审。

(2) 模型工作组 试验模型的制作、调节模拟及模型在水池中的布置。

(3) 仪器组 试验所需各类仪器的准备、标定,试验中各类测量数据的实时采集。

(4) 海洋环境组 按试验要求模拟水深、风、流及波浪,在试验中按规定造风、造流、造波。

(5) 数据分析人员 试验数据的处理、分析,提交最终的分析结果。

(6) 摄像人员 照片拍摄、录像,最终编辑制作成光盘。

### 2) 编制试验大纲

编制试验大纲是实验室正式开展试验研究项目的首要工作。项目负责人应仔细阅读委托单位的技术任务书,全面领会任务书中的试验目的、有关基本原理、具体的试验内容、各项技术要求以及掌握试验项目所必需的技术资料(主要是试验对象的设计技术资料和工作海域的环境条件资料),同时结合实验室设施的功能、水池可供进行该项试验的时间等作出总体考虑,以确保可以按时、保质、保量地完成所委托的试验研究任务。在这一过程中,项目负责人与委托单位进行充分的沟通和协调,以便相互了解,同时项目负责人还与实验室其他有关人员就试验项目的相关技术问题进行必要的讨论。在此基础上编制模型试验的大纲。

试验大纲编制完成后应正式提交委托单位,表示实验室能够完成委托任务的技术保障和总体安排,一般需要得到委托单位的同意认可。同时试验大纲也是实验室所有参试人员具体进行模型试验研究项目的主要指导性文件。

试验大纲的主要格式与第8.2节介绍的技术任务书大体类似,主要内容应包括:

(1) 引言 简单介绍试验研究的目的、主要内容和工程背景。

(2) 试验模型 所选定的模型缩尺比。海洋平台主体、系泊系统和立管系统等所有试验模型的主要技术参数列表,而且对表中的每一项参数,都应同时列出实际值和经过换算后的模型值。海洋平台主体、系泊系统和立管系统等所有试验模型在水池中的布置图以及相关参数的模型值。

(3) 海洋环境条件 详细列出所有水深、风、浪、流等不同参数、不同方向组合的海况列表,并进行编号,表中还要同时列出所有参数的实际值和经过换算后的模型值。必要时,需要对表中所列水深、风、浪、流等数据作进一步的详细说明,特别是风、浪、流校验时测量仪器的布置位置、测试时间等,使得试验参与人员都能准确无误地理解和参照执行。

(4) 试验内容 用表格的方式详细列出所有需要开展的试验内容,如静水衰减试验、风力和流力标定试验、锚泊线和系统水平刚度试验、规则波试验、不规则波试验等,并依次给出试验编号。对每项试验中的平台载况、系统布置情况、海洋环境条件等,都要作详细说明,以示区别,并使得试验参与人员都能准确无误地理解和参照执行。对于规则波试验和不规则波试验的时间、数据采样频率等,也需要作明确规定。

(5) 测量数据和仪器 列出所有需要测量的物理量以及数目、位置参数等,并相应给出需要用的测量仪器的名称、规格、量程等。

(6) 日程安排 列出模型制作、海洋环境条件模拟、模型在水池中试验以及撰写试验报告等试验研究项目各主要环节的完成日期。

## 8.4 试验准备

严格来说,对试验所作的总体安排和编制试验大纲也都属于试验准备阶段的内容,除此之外,在试验准备阶段还应同时进行下列三项内容:

### 1) 模型的制作与模拟调节

根据选定的缩尺比和相似理论,对海洋平台本体、上层建筑制作模型,并模拟调节重量、重心位置及横向、纵向的惯性半径;对系泊系统和立管系统的所有锚泊线、立管以及防护垫等制作模型,并模拟调节单位长度重量、弹性等力学特性。模型的制作与模拟调节都应符合相应的技术要求和精度要求,并获得委托单位的认可。

### 2) 测试仪器的选用和标定

对于试验中需用的各类测量仪器,如光学运动测量仪、加速度仪、浪高仪、风速仪、流速仪及各种测力传感器等都要进行筛选、准备和静态标定。

### 3) 海洋环境条件的模拟

根据缩尺比和相似理论,在水池中模拟调节模型试验的水深,造风并测量所需模拟的风速、风向,造流并测量所需模拟的流速、流向,造波并测量所需模拟的波浪时历。关于风、浪、流的模拟结果,应符合相应的技术要求和精度要求,并整理形成必要的图表文件,获得委托单位的认可。

上述三项工作一般是在同一时段内并行开展准备,其中模型制作比较费时费工,一般需要3~4个星期才能完工。模拟调节带有逐步渐近的试错性质,往往需要经过多次调节达到符合要求为止。有关本阶段的工作内容及技术要求等细节,可分别参阅本书第4、5、6各章的介绍。

## 8.5 水池试验

在正式试验之前,首先要将模型安装布置在水池中的正确位置,并将所有要用到的测试仪器安装布置在合适位置,将测试仪器的信号线路接至数据采集系统的相关通道。在这些工作均完成后,方可开始进行各项正式的水池试验。其主要内容包括:

### 1. 模型在静水中的试验

模型本体在静水中的横摇、纵摇及垂荡的衰减试验。

单根锚泊线以及平台和系泊系统(有时还包括立管系统)的水平位移与恢复力之间的静态关系试验(水平刚度试验)。

平台及系泊系统(有时还包括立管系统)模型在静水中的纵荡等单自由度运动衰减试验。

### 2. 规则波和白噪声不规则波中的试验

测量模型在规则波和白噪声不规则波中的运动和受力。

### 3. 不规则波中的试验

测量模型在风、浪、流联合作用下的运动和受力。

模型在水池中进行单项试验的覆盖范围较广,而且每项试验要求测量的参数又多,为了避

免混淆,需要特别规定两种编号。一是各单项试验的编号,另一个是各测量仪器接至采集系统通道的编号。

为了保证试验的有序进行,实验室专门制定水池试验的执行计划表,计划表的内容主要包括单项试验的序号。各序号所对应的海洋环境条件(风速、风向,流速、流向,有义波高及浪向)以及要求测量的参数(模型的六自由度运动、加速度、各系泊缆的受力、风速、流速、浪高等等)。

有关本阶段的工作内容及技术要求等细节,可参阅本书第7章中的有关介绍。在某一单项试验序号的工作完毕后,对实时采集的各项测试数据应进行初步的统计分析,并给出相应的最大值、最小值、平均值及均方差等基本统计特性。

## 8.6 试验总结

模型在水池中所有的试验工作完成后,需要进行各项测试数据的处理和分析,撰写试验研究的主报告及数据报告,编辑照片和录像。在及时完成初步的试验报告(包括主报告和数据报告)后,应提交委托单位审查。在收到委托单位的审查意见后,应对初步试验报告进行必要的修改和完善,并作相应的修改说明,形成最终的正式报告。最后,将正式报告、数据光盘、录像光盘等提交给委托单位,经评审验收通过后,便完成了整个试验研究项目的所有工作。

试验主报告是整个项目最为重要的关键性的研究成果文件,数据报告是汇总各个单项试验数据分析的结果,作为主报告的附件。现就编写试验研究主报告的内容与要求概述如下:

### 1. 前言

扼要叙述试验项目的背景、目的、试验内容等。

### 2. 试验设备及仪器综述

简要介绍水池的主尺度,水深调节、造风、造流及造波系统的装备、功能及能够调节达到的最大水深、风速、流速及波高。

本试验中选用的测量仪器的名称、量程及测量精度。

### 3. 相似定律简介

主要介绍试验的理论基础,说明本试验所遵循的相似准则并导出模型和实体之间各种物理量与缩尺比之间的关系。由此作为试验中模型数值转换至相应实体数值的依据。

### 4. 模型制作及相关的模拟调节

说明海洋平台本体及上层建筑的模型制作方法、步骤、材料以及加工精度,给出模型的简图、照片。简要介绍重量、重心位置、惯性半径的调节情况及模拟的最终结果。列出实体与模型的主要参数对照表。

说明系泊系统和立管系统等其他模型的制作情况,以及单位重量和弹性等力学特性的模拟调节结果。列出所有模型所对应的实体和模型的主要参数对照表,以及弹性等力学特性的模拟曲线,给出所有模型的简图、照片。

### 5. 海洋环境条件的模拟

主要说明所需要模拟的海洋环境条件,包括水深、风、浪、流以及浪、流不同组合的模拟。根据相似准则依次介绍上述各项进行模拟的方法、过程及模拟的最终结果。将模拟结果(测量值)与任务书中规定的目标值进行比较并给出模拟的精度。模拟结果应以图表的形式表达。

#### 6. 试验测量仪器的标定

对试验中所用各类测量仪器的用途进行说明,并分别说明标定的方法、过程及结果,标定的结果应以图表的形式表达。

#### 7. 试验工况及模型在水池中的布置

列表给出所有进行试验的工况,对各个试验依次进行编号并说明每个试验的目的、内容以及对应的平台载况、海洋环境条件。必要时,还要说明系泊系统情况、作业工况等,以示各个试验工况之间的区别。

对于每一类型或每一组别的试验,详细说明模型在水池中的布置情况,给出相关的布置简图和照片。对于在风、浪、流中的各项试验,应明确标出风、浪、流与模型之间的方向和夹角。散布式的系泊系统应标明各锚泊线的编号。

#### 8. 试验过程、数据采集与分析

对于每一种试验,包括模型在静水中的试验、风力和流力试验、规则波中的试验以及不规则波中的试验,分别说明试验的方法、过程,对于不规则波中的试验应说明每次试验的持续时间。

简要介绍试验数据采集系统的使用方法、过程和数据的采样频率。

列表给出试验中所有采集测量数据以及计算分析数据的参数名称、单位及相应的通道编号,对测量数据的定义、位置参数等给出简要说明。

对试验中所采用的坐标系统,坐标的正负方向及有关测量参数的正负方向应给出明确的定义和示意图。

所有这些列出的信息及相关说明都应最终与最终试验报告和数据报告中给出的数据分析结果完全一致,使得阅读报告的人员能够准确无误地理解和应用报告内容。

#### 9. 试验结果与分析

对采用的试验数据分析方法、分析得出的各项数据和图表等应给予必要的解释。

对于每一种试验,包括静水衰减试验、水平刚度试验、风力和流力试验、规则波及不规则波中的试验等,分门别类地以图表的方式给出试验的分析结果。对委托单位最感兴趣的一些试验内容,应以数据分析结果为依据,进行进一步的整理和总结分析,给出相关的分析结论或建议。

#### 10. 总结

对整个试验进行扼要的总结,列出主要的结论和建议。

#### 11. 封面、扉页和目录

封面应以醒目的字体给出:试验报告的编号、项目名称、委托单位、实验室名称、完成报告的日期。

扉页内容除上述各项外,还需给出试验报告的撰写人员、数据分析人员、审核人员的姓名。

目录应列出试验报告中各项内容的标题及其对应的页次,便于查阅。

# 第 9 章 深海平台模型试验技术概述

走向深水( $\geq 500\text{m}$ )及超深水( $\geq 1500\text{m}$ )已是当今世界海洋油气工业发展的必然趋势。为寻找新的油气资源,世界各大石油公司纷纷进入深水及超深水领域,使得深水海域油气田勘探开发活动蓬勃发展,深海工程技术与装备成为国际海洋工程领域的前沿科技研究热点,各种适应深海恶劣环境的新型深海平台概念不断涌现,包括深水导管架平台(FP)、顺应式平台(CT)、浮式生产储油装置(FPSO)、张力腿平台(TLP)、大型深水多功能半潜式平台(SEMI)、单柱式平台(SPAR)、浮式塔(FT)、浮式生产钻井储油装置(FPDSO)等。其中,四种浮式深海平台型式应用最广,包括FPSO、SEMI、TLP和SPAR。目前,TLP最大工作水深已达1250m,SPAR最大工作水深已达1830m,FPSO最大工作水深已达1900m,深水多功能半潜式平台最大工作水深更是达到3000m。

这些浮式深海平台及其相配套的系泊系统和立管系统,由于所处海洋环境和地质条件恶劣,其技术复杂、投资巨大、风险极高。因此,如何准确地获得其在严酷海洋环境下的运动与受力等技术性能十分重要,这些性能参数是决定系统设计的重要依据。随着世界深海工程的迅猛发展,荷兰、挪威、巴西、美国、中国等国家纷纷建设海洋深水试验池,开展新型深海平台系统的模型试验研究。

尽管如此,这些海洋工程水池的尺度(长 $\times$ 宽 $\times$ 深)仍然是有限的。超深水的深海平台对模型试验水池的尺度要求越来越大,超出了当今世界现有水池的尺度范围。以工作水深为3000m的深海平台模型试验为例,假定缩尺比为1/70,则要求水池的水深约为43m,而通常的系泊锚链线水平跨距约为5倍水深,因此水池尺度需要430m $\times$ 430m $\times$ 43m以上,才能将深海平台及其系泊锚链线和立管等模型全部布置在水池中。当今世界上还没有这样大的水池,也没有哪个国家准备建造如此庞大的水池及其相应设施。

如何利用模型试验结果,比较正确地预报这类深海平台在海洋环境条件下的运动和受力问题显得十分重要。由于海洋工程水池尺度(长度、宽度和深度)的限制,如采用常规的缩尺比,则深海平台及其系泊系统的模型已无法全部布置在水池中。因此,深海平台的模型试验技术就成为国际海洋工程界十分关注的问题。

因此,采用常规缩尺比和常规模型试验技术,即使近年来新建的各深水试验池,也不可能解决所有的深海平台模型试验技术问题。于是,不少研究者致力于模型试验技术本身的探讨,以寻求解决问题的途径。

## 9.1 解决深海平台模型试验技术的途径

第22届(1999年)和23届(2002年)国际船模试验池会议上专门讨论和总结了有关深海平台模型试验的研究现状,并提出解决此问题有下列三种途径。

### 1. 用极小比尺的模型进行试验(Ultra-small Scale Model Testing)

提出此问题的根据是:在海洋平台的模型试验中通常不考虑粘性的影响,相似定律只满足

实体和模型的 Froude 数和 Strouhal 数相等,因而采用很小的模型进行试验也未尝不可。如果取实体和模型的缩尺比为 1/200,则现有的一些海洋工程水池就可以进行工作水深 2 000m 左右海洋平台的模型试验。

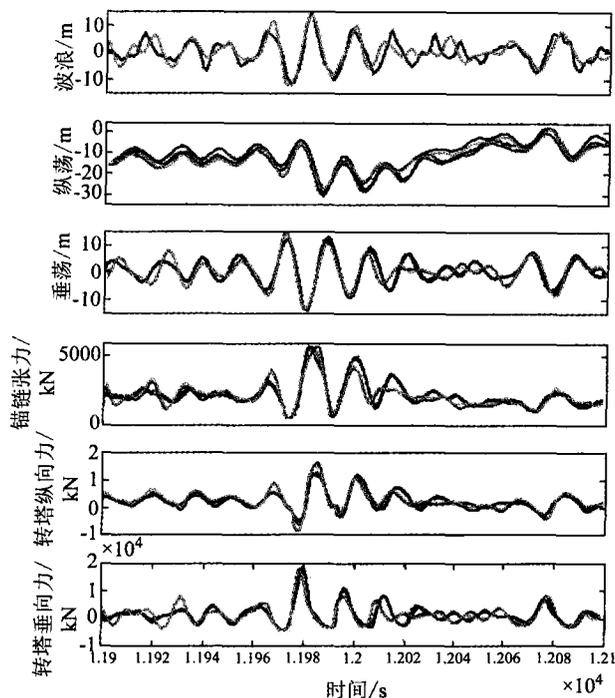


图 9-1 极小模型试验结果对比图

中,进行深海平台的模型试验,也许是解决问题的途径之一。其可取之处是能采用常规的模型缩尺比,系泊系统和立管系统的布置可不受水域尺度的限制。在进行试验时,同步测量天然水域中模型附近的风、浪、流等数据及模型的运动和受力,由此可以建立两者之间的响应关系,进而预报实际深海平台系统的受力和运动性能。

其不足之处除在野外组织和进行模型试验存在诸多不便以外,最根本性的缺点是在天然水域中不可能模拟规定的海洋环境条件。对于实际的海洋工程项目而言,委托单位都明确规定了模型试验所需要模拟的海洋环境条件,而在天然水域中无法模拟这种指定的海洋环境条件,也就不可能进行实际工程项目的模型试验。因而这种方法也许只能做一些研究性质的试验。

### 3. 混合模型试验技术(Hybrid Model Testing)

所谓混合模型试验技术,是将理论数值计算模型和物理模型结合起来进行试验的方法。因为受到水池尺度限制,试验时将系泊系统和立管系统等做水深截断处理,截断后的系泊缆和立管按一定的数值方法进行模拟,这样即可用标准缩尺比的模型在有限尺度的海洋工程水池中进行试验研究,而且在物理模型试验中已考虑了整个系泊系统和立管系统的运动及受力。图 9-2 是说明混合模型试验技术的示意图。

混合模型试验技术就其本质来说,主要还是在海洋工程水池中进行物理模型试验,只是作

挪威 MARINTEK 水池为此专门进行了比较性试验,两个模型的缩尺比分别为 1/55 和 1/170,两者在波浪中试验的响应曲线基本一致,如图 9-1 所示。因而认为极小缩尺比模型试验也许不失为解决深海平台模型试验技术问题的一种办法。但是不少研究者持否定态度,认为小模型的制作精度和模型试验数据测量的正确性得不到保证。如果模型制作的排水量或试验测量中的力有 1g 的误差,则造成实体上的误差将高达 8 000kg 之多(缩尺比 1/200),因而用极小缩尺比模型的试验数据来预报深海平台系统的运动和受力等情况,其结果是不可靠的。

### 2. 在自然水域中进行模型试验(Outdoor Testing)

一些学者提出,在某些水深 40m 以上的湖泊或近岸海湾的合适水域

水深截断后的系泊系统和立管系统要按数值计算的结果模拟,而且模型试验的结果一般需要同平台本身与系泊和立管系统的耦合数值计算过程相结合,才能作为最终依据应用于深海平台系统的设计。由此可见,混合模型试验技术的关键是如何正确模拟水深截断系统以及如何进行可靠的耦合数值计算。

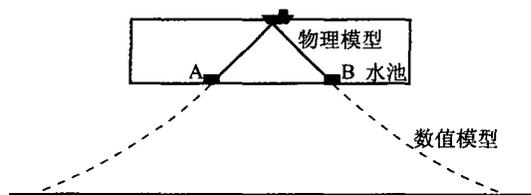


图 9-2 混合模型试验技术示意图  
(A、B为系泊缆截断处)

在上述三种解决深海平台模型试验技术问题的方法中,国际海洋工程界普遍认为:混合模型试验技术是解决深海平台模型试验最有希望的有效途径。近十年来,不少学者从事这方面的研究工作,成为当今深海工程研究领域中的重要的前沿课题之一。后续章节主要依据近年来的研究进展情况,进行较为详细的介绍。

## 9.2 混合模型试验技术

如上所述,混合模型试验技术的本质还是在海洋工程水池中进行水深截断模型试验,而对于水深截断系泊系统和立管系统的正确模拟则是应用混合模型试验方法进行深海平台系统模型试验研究的关键之一。根据水深截断系统模拟所用方法的不同,目前有两种混合模型试验技术:(1)被动式混合模型试验技术。

(2)主动式混合模型试验技术。

### 9.2.1 被动式混合模型试验技术

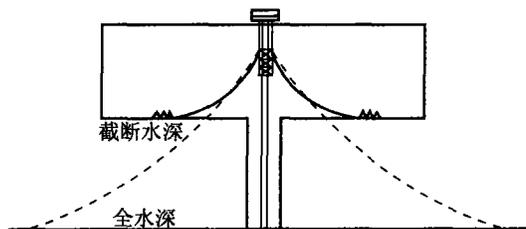


图 9-3 被动式混合模型试验技术原理示意图

被动式混合模型试验技术的基本原理可用图 9-3 的示意图来表示。选用常规缩尺比,根据海洋工程水池所能模拟的有效水深范围,确定截断水深大小。将深海平台的实际全水深系泊/立管系统在截断水深处进行截断,借助数值计算手段,根据必要的等效原则,设计一套新的、等效的水深截断系泊/立管系统,来代替实际的全水深系统。采用常规

的缩尺比、常规的模型试验技术,对深海平台和水深截断系泊/立管系统进行制作和模拟,并在截断水深情况下进行模型试验。

在这个过程中,数值计算被用于得到全水深以及水深截断系泊/立管系统的力学特性,如静回复力特性等,还用于水深截断系统的优化设计。

水深截断系泊/立管系统的等效设计目的,就是要尽可能地使得深海平台在截断水深获得和实际全水深一致的运动响应,因此必须遵循相应的等效设计原则。目前国际上公认的等效设计原则主要有:

- (1) 保证锚泊线与立管的数目及其布置情况一致。
- (2) 保证系泊/立管系统对深海平台的静回复力一致。
- (3) 保证深海平台主要运动准静定耦合下的系泊/立管系统静力特性一致。

(4) 保证单根系泊缆和立管的张力特性一致。

(5) 保证系泊缆/立管在波浪和海流中的惯性力、阻尼力等流体动力一致。

如果能够完全符合上述等效设计原则,则可保证水深截断系统和全水深系统具有完全相同的静力和动力特性,实现完全动力等效,如此进行的截断水深模型试验结果可以直接作为实际全水深深海平台系统的最终结果。

然而,上述等效设计原则是非常严格的,要做到完全遵循和实现完全动力等效,几乎不可能。就目前的进展而言,第(1)条原则一般都可以满足,第(5)条代表动力等效的原则尚无法满足,第(2)~(4)条代表静力等效的原则也只能根据具体深海平台系统的情况部分地、近似地满足。比如,深海 SPAR 平台系泊系统的截断水深等效设计,只能满足:

(1) 锚泊线数目与布置情况一致。

(2) 系泊系统的水平和垂向静回复力特性近似相同。

(3) 单根系泊缆的张力特性近似相同。

(4) 纵荡与纵摇运动准静定耦合下的系泊系统静力特性近似相同。

因此,采用未能实现完全动力等效的水深截断系统所进行的截断水深模型试验结果,与实际全水深系统的情况存在差异,这种差异在实际水深和截断水深差别较大时,更为显著,如果直接应用,势必将给实际深海平台系统的海上作业带来隐患。

早期发展的被动式混合模型试验技术只是进行水深截断系统的等效设计和进行截断水深的模型试验,并根据试验结果直接预报实际深海平台系统的水动力性能。随着深海平台的作业水深越来越大,其与截断水深的差别也越来越大,这种做法的风险随之增加。为了提高被动式混合模型试验技术的可靠性,ITTC 提出在采用水深截断系统的截断水深模型试验的基础上,选用时域耦合的数值计算软件,引入后处理数值计算过程,包括数值重构计算和数值外推计算。

所谓数值重构,就是建立截断水深模型试验时深海平台系统的数值模型,对截断水深模型试验进行“复制式”的模拟,通过调整相应的水动力学参数,获得和截断水深模型试验结果一致的平台运动响应和系泊缆张力时历,从而校核时域耦合数值计算软件的准确性。由于截断水深模型试验结果仅用于校准理论数值计算中的若干参数,因而称之为数值重构。

所谓数值外推,就是在时域耦合数值计算软件可用的基础上,仍然采用该软件建立全水深深海平台系统的数值模型,充分考虑深水系泊/立管系统与海洋平台之间的耦合,得到全水深的计算结果,并将该结果作为最后的混合模型试验结果。

这种方法的基本思路是企图弥补:

(1) 被动式模型试验中没有考虑截断系泊系统的动力特性及阻尼等问题的模拟,将试验结果直接预报实体会引起较大的误差。

(2) 现有的理论数值计算模型固然可以得出深海平台在风、浪、流作用下的运动及受力性能,但由于在计算中引入诸多假定和应用了一些经验性质的数据,其计算结果的可靠性并无太大把握。因此,这种模型试验与数值计算相结合的方法为目前普遍采用。

目前,被动式混合模型试验技术的主要流程如图 9-4 所示,主要包括水深截断系泊系统设计、截断水深模型试验、数值重构计算和数值外推计算等方面的内容。

在设计水深截断系泊系统时,一般采用和全水深系统相同的预张力、相同的系泊缆布置形式。系泊缆的成分,尽可能使用锚链来模拟锚链,用钢丝绳来模拟钢丝绳。系泊缆接近水面的

部分应尽可能与全水深系统保持一致。水深截断系泊系统的设计要充分考虑数值计算软件处理非均匀材质的能力,否则无法对截断水深的模型试验结果进行数值重构,因此 IT-TC 不推荐使用滑轮等摩擦力难于量化的复杂机构。为保证水深截断系泊系统关键的静力特性与全水深保持一致,需要通过参数调节进行“试凑”。为了减少人工试凑寻优的工作量,已有一些水深截断系泊/立管系统辅助优化设计的软件面世。

在对截断水深模型试验结果进行数值重构时,需要按照试验记录的真实参数建立深海平台与水深截断系泊/立管系统的数值模型,输入试验时记录并经过校核的风和波浪的时历。将数值计算后得到的统计分析结果和谱分析结果与试验结果进行比较,通过调整经验性的水动力参数,例如平台慢漂力系数、风力和流力系数、阻尼系数以及锚泊线和立管的阻尼及惯性力系数等,进行反复试算,最终使得深海平台系统的运动和受力等的计算结果和模型试验结果基本一致。数值重构的主要目的是为了校验数值计算所采用的时域耦合数值计算软件和数值模型的可用性和准确性,掌握该数值软件的使用方法,并获得深海平台系统关键的水动力参数。

在数值外推计算过程中,需要按照全水深深系泊/立管系统的参数建立数值模型,采用经过截断水深模型试验和数值重构计算验证的水动力学参数,如系泊缆的阻尼及惯性力系数等。由于仅考虑静力等效的水深截断系泊/立管系统一般不能正确的模拟波频的全水深深系泊/立管顶端张力和阻尼,所以数值外推计算的主要目的是要充分考虑到深海平台与深海系泊/立管系统之间的耦合作用。

这种截断水深模型试验与数值计算相结合的深海平台系统被动式混合模型试验技术虽然为目前普遍采用,但也存在一些局限:

(1) 需要相当可靠的深海平台/系泊/立管时域耦合数值计算软件作为支撑,才有可能得到满意的结果。

(2) 在数值重构过程中如何采用合适的带有经验性质的水动力参数,以及如何调整这些参数,都需要有相当丰富的经验积累和这些参数的实际参考数据。

(3) 这实际上是一种间接模型试验技术,实际所需要的全水深深海平台系统的运动和受力特性不是通过直接的模型试验手段获得,而是通过间接的数值计算手段获得。

### 9.2.2 主动式混合模型试验技术

直接通过模型试验获得所需要的结果无疑是理想的选择,这就是采用主动式模拟的混合模型试验方法,其基本原理可用图 9-5 的示意图来表示。所谓主动式模拟,就是按水池所能模拟的水深,在池底应用一套实时计算机控制装置和伺服机构来替换每根系泊缆/立管的截断部分,主动地模拟系泊缆/立管在截断处的运动和受力,如此进行模型试验,直接获得实际系统的动力特性。

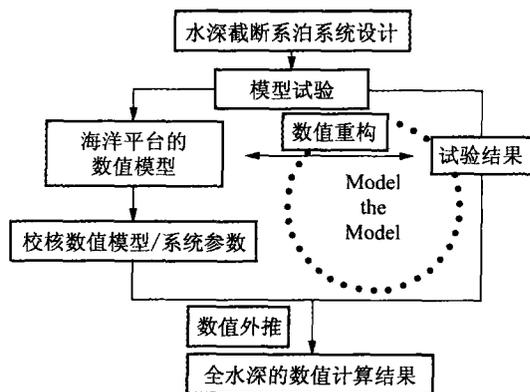


图 9-4 被动式混合模型试验技术的流程

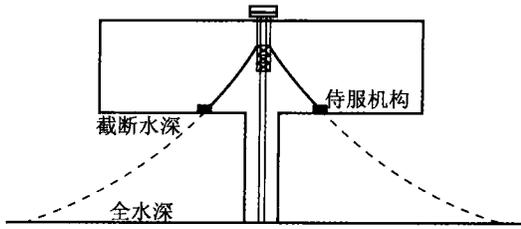


图 9-5 主动式混合模型试验技术原理示意图

安装于系泊缆/立管截断处的实时控制装置和伺服机构是主动式混合模型试验技术的关键。在浪、流以及浮式平台运动的共同作用下，系泊缆/立管在截断点处有上下、前后和左右的三个方向运动，而且张力也在实时地变化。要在试验中实时地模拟这个截断点处的运动和受力，首先必须应用可靠的时域耦合数值计算软件，计算得到实际全水深

情况下各系泊缆/立管在截断点处的运动及受力等时间历程。然后，在截断水深的模型试验中，根据水池环境条件模拟和深海平台运动的实际情况，通过实时控制装置和伺服机构，实时地对所有系泊缆/立管在截断点处的三个方向空间运动以及受力等进行控制和模拟。试验结束后，将试验结果经过常规的分析换算，直接预报全水深深海平台系统在实际风、浪、流作用下的运动和受力性能。

主动式混合模型试验技术虽然基本原理清晰，但要真正很好地实现却面临着极大的技术困难。实际上，要用一套控制装置和伺服机构来完全代替全水深情况下系泊缆/立管截断部分的运动和受力极难做到。首先，要准确地计算得到全水深情况下系泊缆/立管在截断处的运动和受力已十分困难，需要相当可靠的深海平台/系泊/立管时域耦合数值计算软件作为支撑。然后，即使已由数值计算得到了截断点处运动和受力的时历数据，要在试验中实现对截断点处的实时控制，使得该处运动和受力的时历与数值计算相一致，还需要一套非常复杂和精确的实时控制系统。因此，尽管已有一些关于主动式混合模型试验技术可行性研究的报道，但迄今尚未取得实质性进展。

### 9.3 混合模型试验技术的可靠性验证

应用混合模型试验技术是否能比较正确可靠地预报深海平台及其系泊系统和立管系统在风、浪、流作用下的运动和受力等水动力性能，是海洋工程界十分关注的问题。从原则上说来，主动式模拟的混合试验方法虽然相当理想和完美，但是对系泊缆/立管截断处的模拟在技术上尚未妥善解决，目前还处于研究阶段。截断水深模型试验结合数值重构与外推计算的被动式混合试验方法，虽已可用于预报深海平台系统的水动力性能，但其结果是否正确可靠，误差的范围能否为工程界所接受，需要进行可靠性的验证试验。目前可靠性试验的比较标准或基础一般限于模型试验的范围，其主要思路或研究步骤是：

(1) 对于全水深的海洋平台及其系泊系统以某一缩尺比的模型在海洋工程水池中进行试验，将试验数据进行分析并预报实体的运动和受力情况。由此得到的结果作为验证的标准。

(2) 以同一缩尺比的模型在海洋工程水池中进行截断水深情况下的试验。系泊缆的截断处采用被动式模拟，截断系泊缆的数量、布置以及主要静力特性与全水深系泊缆近似一致。然后将模型试验数据进行分析并直接用于预报实体在全水深时的运动和受力情况，并与全水深试验的预报结果进行比较，由此判断采用被动式模拟方法的截断水深模型试验结果的正确性和误差范围。

(3) 以被动式模拟的截断水深模型试验数据作为标准，对于理论数值计算中的若干经验

性质的数据进行反复调整重构,直到理论计算的最终结果与模型试验基本吻合为止。根据这些重构的有关水动力参数,通过理论计算直接得出全水深时海洋平台的运动和受力情况。然后与全水深试验的预报结果进行比较,由此判断经过数值重构和数值外推计算的混合模型试验结果的正确性和误差范围。

从逻辑上来说,上述验证性研究的思路是比较严密的。但是由于既要进行全水深和截断水深的模型试验,而且模型的缩尺比又不能太小,因此在验证性试验中,全水深和截断水深之比一般不宜太大。

作为混合模型试验技术验证性研究的实例,下面简要介绍上海交大海洋工程国家重点实验室的有关结果。

验证性试验研究是在上海交大海洋工程水池中进行。模型试验以  $10 \times 10^4$  t 级内转塔式系泊 FPSO 为对象,实体的主尺度为  $225\text{m} \times 46\text{m} \times 15\text{m}$ ,排水量为  $14.5 \times 10^4$  t。系泊系统的平面布置情况及系泊缆的编号如图 9-6 所示。

模型的缩尺比取  $\lambda=80$ ,FPSO 模型的主尺度为  $2.8125\text{m} \times 0.575\text{m} \times 0.1875\text{m}$ 。根据水池的主要尺度,选定模型试验的全水深为 4m,截断水深为 2m,分别相应于实际 FPSO 的工作水深为 320m,截断水深为 160m,全水深与截断水深之比为 2.0。试验中采用了 5 种顶风、顶浪的海洋环境条件如表 9-1 所示。

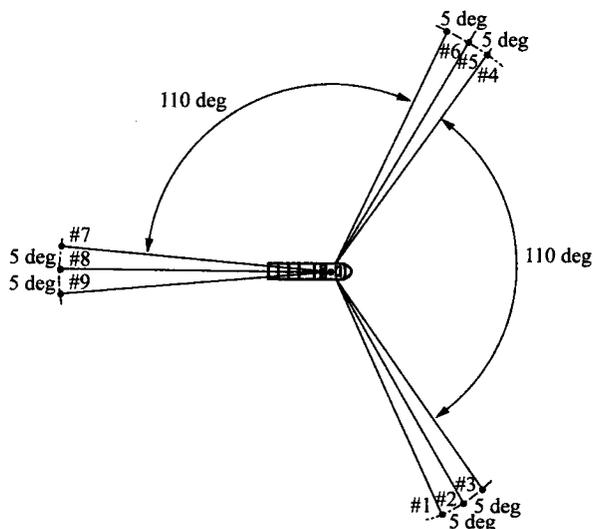


图 9-6 转塔式系泊 FPSO 系统布置平面图

表 9-1 海洋环境条件

海况序号	有义波高/m	谱峰周期/S	浪向	风速/(m/s)	风向/(°)
1	7.3	12.39	180	—	—
2	7.3	12.39	180	36.3	180
3	9.6	14.07	180	—	—
4	9.6	14.07	180	42.0	180
5	12.1	15.90	180	—	—

表中:有义波高 7.3m、9.6m 和 12.1m 分别代表一年一遇、十年一遇和百年一遇的海浪,不规则波浪采用双参数 PM 谱。在海洋工程水池中分别对上述五种海况进行模拟,其结果在 ITTC 规定的误差范围之内。

试验中对于全水深系泊缆特性的模拟相对比较简单,参照通常使用的方法即可,图 9-7 给出了全水深层系泊缆的试验模拟结果。

被动式截断系泊缆的模拟除锚泊线的数目及其布置情况与全水深系统保持一致外,专门设计了等效的系泊系统并配置适当的弹簧、浮筒和重块等装置。通过理论计算和迭代调整,初

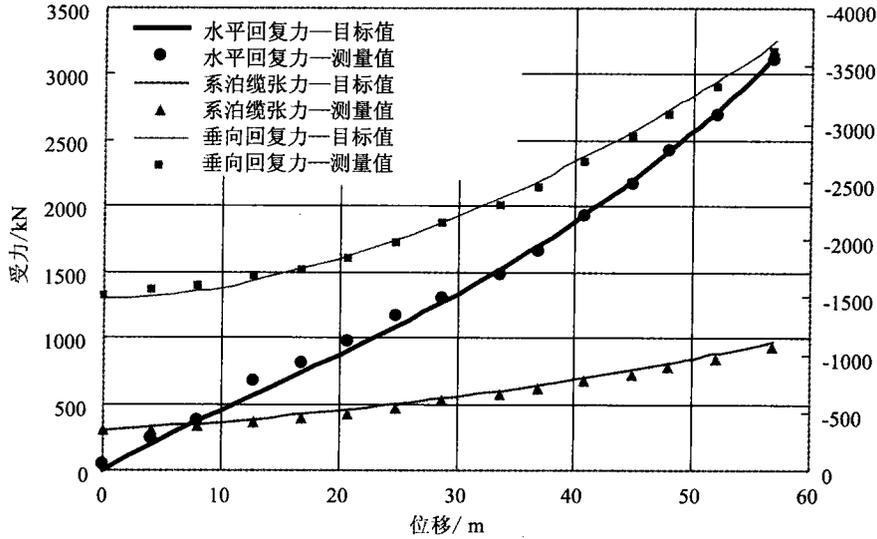


图 9-7 全水深系泊系统静力特性模拟结果

步得到基本静力等效的水深截断系统系泊缆的各种技术参数以及主要的静力特性,包括纵向静回复力特性以及单根系泊缆的张力—水平位移特性,计算结果与全水深系统计算结果的比较如图 9-8 所示。

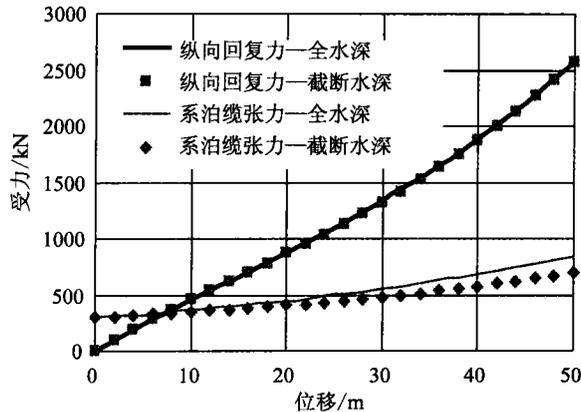


图 9-8 截断水深和全水深系泊系统静力特性计算结果的比较

在试验中,对水深截断系泊系统进行制作和模拟,并对截断系统的系泊缆模型单根锚泊线的张力—水平位移特性和整个系统的纵向回复力特性进行实际测量,测量结果与计算结果的比较如图 9-9 所示。

上述各项准备工作完成后,便对五种海况分别进行全水深(4m)和截断水深(2m)的模型试验。

对于全水深和截断水深的模型试验测量结果,通过数据分析直接换算至实际情况下内转塔式系泊 FPSO 的运动及受力,并进行比较验证。在进行数值重构计算时,以截断水深模型试验中所模拟的海况作为输入,通过频域和时域的理论计算求得 FPSO 在截断水深时的模型运动和受力情况,然后以截断水深时的模型试验结果为标准进行比较。经过三次参数调整和数

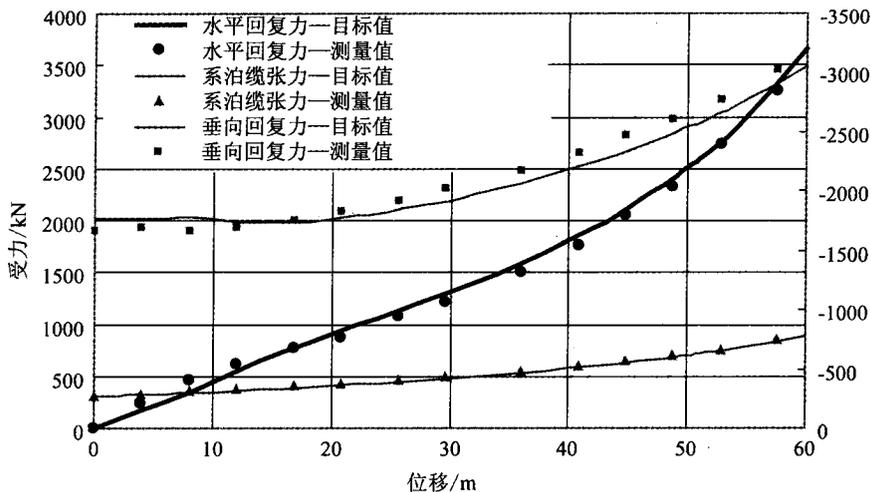


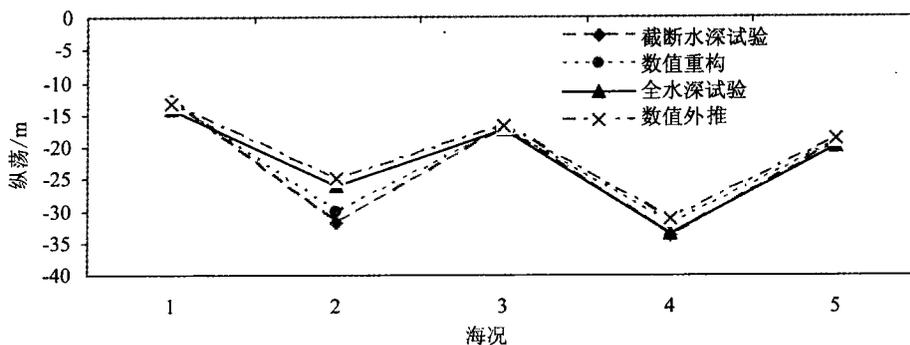
图 9-9 水深截断系泊系统的静力特性模拟结果

值重构计算,选定了相关的水动力系数并得到比较满意的结果。

数值重构计算结果与截断水深模型试验结果的比较是全面的,包括 FPSO 六个自由度运动及各系泊缆绳张力的时历曲线,各项统计分析的平均值、均方差、最大值和最小值等。

数值重构计算结果与截断水深模型试验结果的比较验证完成后,将水深截断系泊系统替换为全水深层系泊系统,便可计算实际转塔式系泊 FPSO 的运动和受力,习惯上称为“向全水深层系统的数值外推”。其步骤是:输入在截断系统模型试验中测得海洋环境(风、浪、流)的时历曲线,选用数值重构过程中调整过的相关水动力系数,采用全水深层系泊系统,计算的最终结果便是实际 FPSO 在全水深情况下的运动和受力。然后与全水深试验结果进行比较,由此判断被动式混合模型试验方法结果的正确性和误差范围。

对于上述 FPSO 混合模型试验技术验证性研究的比较分析相当全面,包括各项数据的时历曲线、功率谱形状以及统计分析结果的比较等。为了节省篇幅,这里仅列出纵荡、纵摇和 1<sup>#</sup>系泊缆张力的统计结果的平均值、均方差和极值在五种海况下的比较情况,如图 9-10~图 9-12 所示。图中—◆—、—●—、—▲—、—×—分别代表通过截断水深模型试验、数值重构计算、数值外推计算、全水深模型试验预报 FPSO 实体的结果。



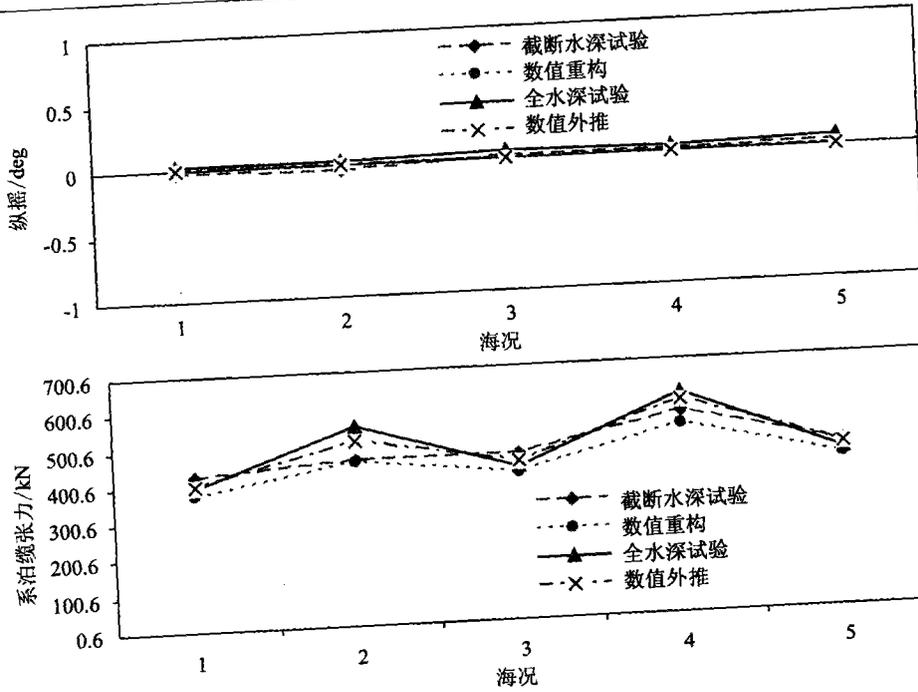
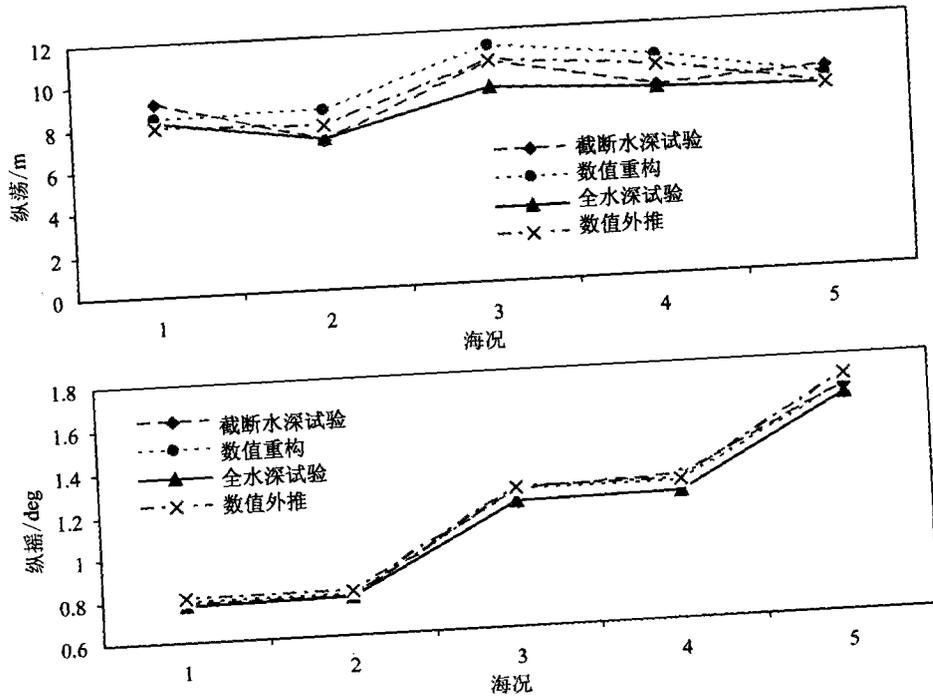


图 9-10 海况 1-5 统计分析平均值的比较



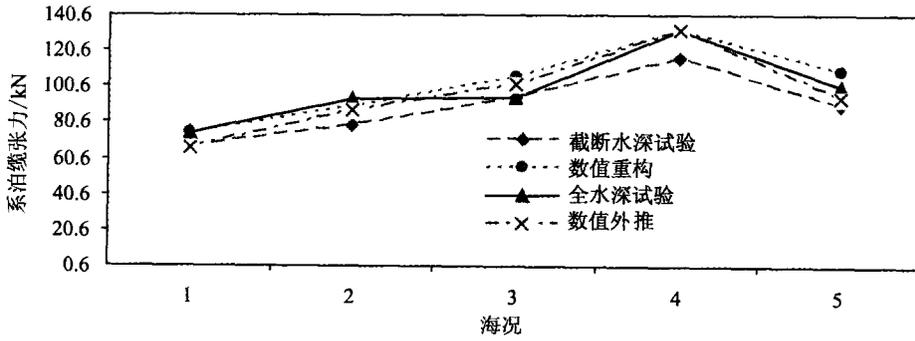


图 9-11 海况 1-5 统计分析均方差的比较

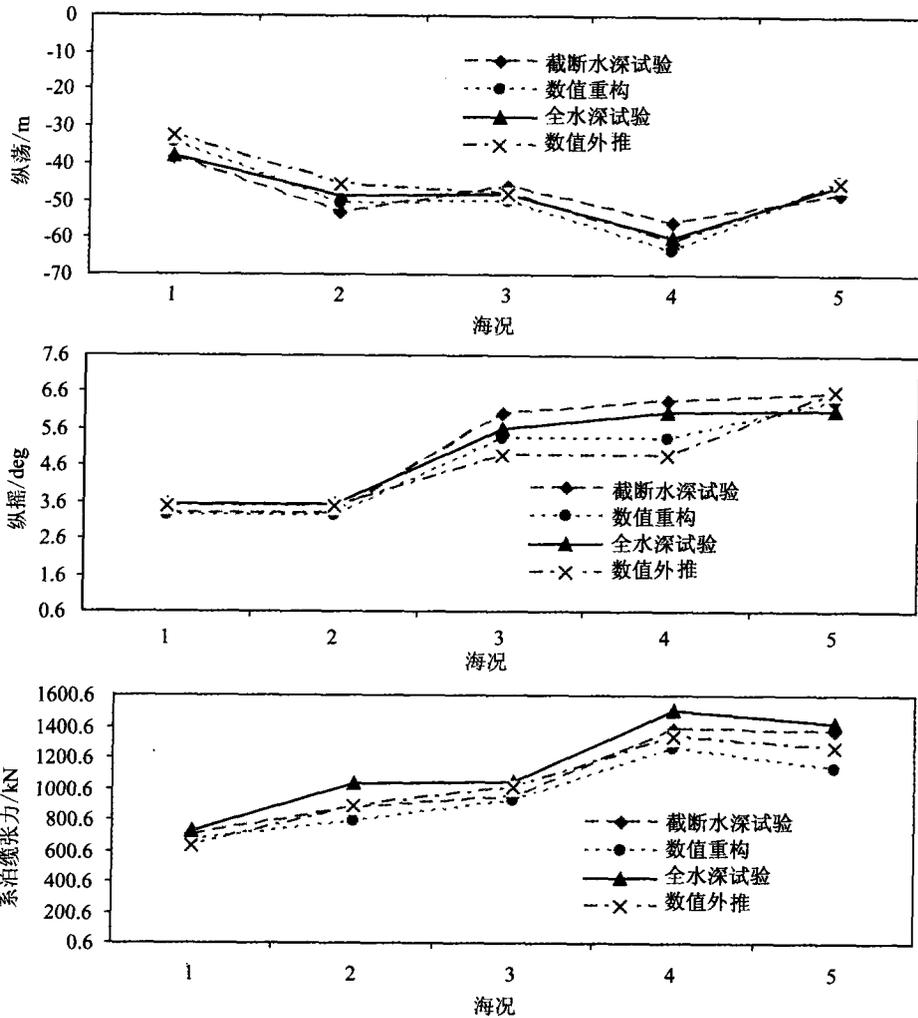


图 9-12 海况 1-5 统计分析最大值的比较

通过对图 9-10~图 9-12 的分析可知,四者的结果总体上是比较接近的,相对误差一般在工程应用的允许范围之内。验证性研究的结果表明:

(1) 在截断水深和全水深相差不大的情况下,采用静力等效设计的水深截断系泊系统所进行的被动式截断水深模型试验结果可以代替全水深系统的模型试验,并可用于预报深海平台实体在全水深情况下的运动和受力。

(2) 结合数值重构计算和数值外推计算的被动式混合模型试验技术能给出比较满意的结果。从原则上讲,这种方法在理论上更为严密,但在根据截断水深模型试验数据进行数值重构的过程中,需要选取和调整相关的水动力系数,这是十分费时费力的经验性工作。

(3) 在一次完整的被动式混合模型试验过程中,同时可以得到被动式水深截断系统的模型试验结果以及相应的数值计算结果,两者都可以预报全水深系统实体的运动和受力,因而能够起到相互引证并对深海平台的设计、建造和施工提供相应的技术依据。

就目前的情况而言,被动式混合模型试验技术已初步能够用于深海平台的工程实际问题,但是存在若干不足之处,主要是:

(1) 被动式模拟技术目前只能满足系泊系统的主要静力特性相一致,未能考虑动力特性等效的有关问题。

(2) 数值重构计算过程虽在原则上比较完备,但需要反复调整经验性质的相关水动力参数。这在一方面表示数值计算方法在理论上不够完善,同时这种经验性调整似乎有“凑数”之嫌。

(3) 现有发表的诸多经验性研究结果,因限于水池尺度,模型试验的所谓全水深与截断水深之比(简称为截断比)一般仅为 2 倍左右,其结论能否推广至更大截断比的深海平台也是需要考虑的问题。因此,用被动式混合模型试验技术所预报的深海平台实体的数据,在实际使用中常需选取较大的安全系数。

混合模型试验技术虽然被认为是解决深海平台模型试验最有希望的方法,但是仍有许多问题尚待进一步探讨。

# 参 考 文 献

- [1] 李远林. 近海结构水动力学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1999.
- [2] 冯铁成, 朱文蔚. 船舶操纵与摇荡[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [3] 孙意卿. 海洋工程环境条件及其载荷[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- [4] 严似松. 海洋工程导论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [5] 陶尧森. 船舶耐波性[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- [6] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(上下册)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003/2001.
- [7] 上海交通大学海洋工程国家重点实验室年报(1992—至今)[R]. 内部资料.
- [8] 各类海洋平台模型试验研究报告. (1992—至今)[R]. 内部资料.
- [9] 国际船模试验池会议文集(19、20、21、22), ITTC Proceedings[C].
- [10] BMT Fluid Mechanics Ltd. Offshore Technology Report 2000-123. Review of Model Testing Requirements for FPSO's(Unpublished).
- [11] 顾懋祥. 离岸工程中的水动力学与实验问题[J]. 海洋工程, 1983.
- [12] 刘应中, 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, 1986.
- [13] 黄祥鹿. 船舶与海洋结构物运动的随机理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1994.
- [14] 刘岳元, 冯铁成, 刘应中. 水动力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1990.
- [15] 张火明. 基于等效水深截断的混合模型试验方法研究[D]. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 2005.