

# 深水浮式平台— 钻完井管柱—防喷器系统 安全设计与操作手册

周守为 刘清友 谢 彬 王国荣 / 编著

非  
外  
借

 科学出版社

# 深水浮式平台-钻完井管柱-防喷器 系统安全设计与操作手册

周守为 刘清友 谢 彬 王国荣 编著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

深水钻完井过程中,深水浮式平台通过隔水管柱连接至海底防喷器,钻完井管柱从平台通过隔水管柱进入地层作业。浮式平台-管柱-防喷器连接组成一个整体装备,完成钻完井作业。该书以浮式平台结构安全设计、钻完井管柱动力分析及其配置组合安全设计、防喷器系统安全设计与控制为主线,建立了深水浮式平台-管柱-防喷器系统安全设计方法,并在此基础上建立了深水浮式平台-管柱-防喷器系统安全操作方法。

该书可为深水钻井设计人员提供设计理论。

### 图书在版编目(CIP)数据

深水浮式平台-钻完井管柱-防喷器系统安全设计与操作手册/周守为等编著. —北京:科学出版社,2018

ISBN 978-7-03-055445-1

I. ①深… II. ①周… III. ①海上油气田-采油平台-技术手册②海上油气田-井下管柱-技术手册③海上油气田-防喷器-技术手册 IV. ①TE951-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 279734 号

责任编辑:吴凡洁/责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟/封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:11

字数:243 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 本书编著委员会

主 编：周守为 刘清友 谢 彬 王国荣

副 主 编：毛良杰 李 阳

编写人员：周守为 刘清友 谢 彬 王国荣 毛良杰

李 阳 谢文会 王俊荣 付 强

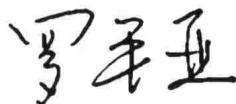
## 序

深水是世界石油工业的主要接替区和科技创新前沿，全球各大石油公司逐步将战略重点转入深水油气资源勘探开发。我国自主研制的超深水半潜式钻井平台“海洋石油981”以及“蓝鲸一号”陆续在南海深水区作业，以及我国第一个自营的深水气田荔湾3-1的顺利投产，标志着我国深水油气勘探开发技术取得长足进步。然而，深水资源开发是一个高投入、高科技与高风险的产业，国外发生过重大的深水油气安全事故。2010年墨西哥湾“深水地平线”号井喷事故造成了巨大的灾难，给深水油气开发的安全问题敲响了警钟。因此，如何确保深水油气资源的安全开发是亟待解决的问题。

深水钻完井过程中，深水浮式平台通过隔水管柱连接至海底防喷器，钻完井管柱从平台通过隔水管柱进入地层作业。浮式平台-管柱-防喷器连接组成一个系统装备，用于钻完井作业。该系统装备既受到海洋环境作用，与系统间又相互影响，浮式平台-管柱-防喷器的安全设计与安全操作对于确保深水油气资源的开发具有重要意义。

该书在总结前人研究成果的基础上，以浮式平台结构安全设计、钻完井管柱动力分析及其配置组合设计、防喷器系统安全设计与控制为主线，建立了深水浮式平台-管柱-防喷器系统安全设计方法，并在此基础上建立了深水浮式平台-管柱-防喷器系统安全操作方法。该书既可为相关设计人员提供设计理论，也可为现场工程师提供操作指导，同时该书也可作为石油地质类高校教师、国内外石油科研院所人员参考用书。

相信此书的出版必将为石油开发领域的设计人员、现场工程人员、科研工作者等的工作和学习带来有益的指导。



中国工程院院士

2017年10月

## 前言

深海蕴藏着非常丰富的油气资源，未来世界石油地质储量的 44%将来自深海，世界海洋石油经历了从浅水到中深水、再到深水的发展历程，进入 20 世纪 80 年代后，随着北海、墨西哥湾、巴西等深水油气田的勘探发现，人类开发海洋石油的重点转向深水。目前，海洋石油已经成为世界油气开发的主要增长点，而深水油气更成为海上油气的主要增长点和科技创新的前沿。

然而，南海的深水油气田开发将面临诸多挑战。首先，南海是世界上环境条件最为恶劣的海域之一。深水环境波浪高、表面流速大、台风多发，并且南海也是内波出现频次较高的海域，海底地质条件复杂(包括海底滑坡、海底陡坎、浊流沉积层、碎屑流沉积等)。其次，我国缺乏深水油气田开发的成套装备，在深水半潜式钻井平台“海洋石油 981”建造之前，我国仅能生产第二代半潜式钻井平台，只能在水深 200m 的浅海作业。另外，开发深水油气资源，不仅需要钻井平台、隔水管、钻柱、测试管柱等组成钻完井管柱，防喷器系统也是深水开发的关键设备。一旦钻完井管柱断裂、防喷器失效，将无法正常钻井，甚至影响平台安全。因此，建立深水浮式平台-管柱-防喷器系统安全设计方法与安全操作方法已成为国内外油气勘探开发领域亟待解决的重要课题之一。

《深水浮式平台-钻完井管柱-防喷器系统安全设计与操作手册》在前人研究工作的基础上，阐述了深水浮式平台-管柱-防喷器系统，深入分析了用于浮式平台设计与管柱组合配置设计的海洋环境；讨论了深水半潜式钻井平台结构设计计算关键技术与浮式平台运动分析方法，开展了浮式平台水动力载荷研究，分析了不同工况下浮式钻井平台升沉运动响应，并深入探讨了浮式平台运动耦合失稳现象；分析了平台运动对钻井作业的影响，建立了深水钻完井双层管柱动力学分析方法，并开展了深水钻完井双层管柱动力特性分析；分析了防喷器的分类及其工作原理，分析了海底防喷器基本结构与深水海底防喷器控制系统，最终在此基础上提出了浮式平台安全设计方法与安全操作方法、钻完井管柱安全设计与安全操作方法及防喷器安全设计与安全操作方法。本书的内容在深水半潜式钻井平台设计及现场作业中获得成功应用，确保了深水油气资源的安全高效开发。

在撰写本书过程中，参阅了大量的国内外资料文献，引用了一些其他作者的研究成果，在此谨向文献作者表示深深的谢意。

此外，毛良杰、李阳、谢文会、王俊荣、付强、姜哲等为本书的出版做出了贡献，多位专家对文稿进行了认真的审阅并且提出宝贵意见，“海洋石油 981”平台水下工程师李毅也为本书的实践提供了宝贵意见，科学出版社在本书出版过程中给予了全力支持和帮助，在此一并表示感谢！

本书比较系统地阐述了环境载荷计算方法、深水浮式平台安全设计技术原理、深水钻完井管柱力学分析技术原理、深水防喷器系统安全设计技术原理、深水浮式平台安全操作方法、深水隔水管系统安全操作方法、深水防喷器系统安全操作方法等。由于研究内容丰富，本书只能从整体上反映深水浮式平台-钻完井管柱-防喷器系统安全设计与操作的关键技术内容，个别章节可能在深度上不够，有一些局限性。另外，研究内容涉及的专业面广，在文字编写、书面表达方面难免有疏漏或不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017年5月

# 目录

序

前言

第1章 深水浮式平台-钻完井管柱-防喷器系统简介	1
1.1 深水浮式平台简介	1
1.2 深水钻完井双层管柱系统简介	2
1.3 海底防喷器系统简介	3
1.4 深水浮式平台-管柱-防喷器系统面临的问题	5
第2章 环境载荷计算方法	7
2.1 风载荷计算方法	7
2.2 流载荷计算方法	8
2.3 波浪力计算方法	8
2.4 内波流荷载计算方法	14
第3章 深水浮式平台安全设计原理及方法	16
3.1 浮式平台稳性分析	16
3.2 浮式平台运动分析方法	22
3.3 深水浮式平台结构设计关键技术	29
3.4 浮式平台“纵摇/横摇-垂荡”耦合共振	36
3.5 新型浮式平台设计	40
第4章 深水钻完井管柱力学分析技术原理	48
4.1 平台运动对钻井作业影响分析	48
4.2 深水钻完井双层管柱动力学分析方法	52
4.3 钻完井双层管柱动力学分析	75
第5章 深水防喷器系统安全设计技术原理	105
5.1 防喷器的分类及其工作原理	105
5.2 深水海底防喷器系统设计与控制	109
第6章 深水浮式平台安全操作方法	115

6.1	深水浮式平台压排载操作 .....	115
6.2	深水浮式平台动力定位系统安全操作 .....	118
6.3	深水浮式平台锚泊定位操作 .....	128
6.4	深水浮式平台台风应急策略及隔水管避台应对措施研究 .....	132
<b>第 7 章</b>	<b>深水隔水管系统安全操作方法 .....</b>	<b>138</b>
7.1	不同工况下隔水管系统配置图版 .....	138
7.2	隔水管系统配置指南 .....	138
7.3	隔水管系统安放指南 .....	140
7.4	钻井作业操作指南 .....	141
<b>第 8 章</b>	<b>深水防喷器系统安全操作方法 .....</b>	<b>145</b>
8.1	海上防喷器组选择原则 .....	145
8.2	深水海底防喷器安装规范 .....	146
8.3	深水海底防喷器操作规范 .....	154
8.4	深水海底防喷器控制系统操作规范 .....	157
<b>参考文献</b>	.....	<b>161</b>

## 第 1 章

# 深水浮式平台-钻完井管柱-防喷器系统简介

## 1.1 深水浮式平台简介

走向深水及超深水已是当今世界海洋油气工业发展的必然趋势。深水油气开发具有高风险、高投入、高技术、高回报的特点，其具体表现形式如下：水深超过 300m、离岸远、海洋环境恶劣、钻井费用高、海上施工作业难度大等。因此，深水油气勘探开发一般采用浮式平台，主要包括以下形式：FPSO、SEMI 平台、TLP 平台、SPAR 平台等。

其中，深水半潜式钻井平台具有极强的抗风浪能力、优良的运动性能、大的甲板面积和装载容量、高效的作业效率、易于改造并具备钻井、修井等多种工作功能，可实现整体拖航，其在深海能源开采中具有其他型式平台无法比拟的优势。随着海洋开发逐渐由浅水向深水发展，深水浮式平台将会日渐增多并且广泛应用，本章以深水半潜式钻井平台为例，介绍深水浮式平台安全设计及安全操作的各方面特点。

深水半潜式钻井平台，又称深水柱稳定式钻井平台<sup>[1]</sup>，如图 1-1 所示，为大部分浮体没于水面下的一种小水线面的移动式钻井平台，它是从坐底式钻井平台演变而来的，主要有上甲板、下浮体、立柱、撑杆和重要节点。上甲板用来布置一系列生产设备和生活设施。由于上甲板通常会覆盖下浮体的整宽和大部分的整长，所以半潜式钻井平台具备很大的甲板面积。立柱作为一种柱形结构，多为圆形或方形，它连接半潜式钻井平台的上下两部分，一方面为平台提供浮力，另一方面为平台提供足够的稳性。下浮体结构保证半潜式钻井平台具有足够的浮力克服自身重力，下浮体设有压载水舱，通过压载水舱内水的排出和注入来实现半潜式钻井平台的上浮和下沉。撑杆分为水平撑杆、垂直撑杆和空间撑杆，平台的各部分结构通过撑杆连接为一个整体，撑杆形状多为圆形。此外，在下浮体与下浮体、立柱与立柱、立柱与上甲板之间还有一些支撑与斜撑连接。在下浮

体间的连接支撑，一般都设在下浮体的上方，这样，当平台移位时，可使它位于水线之上，以减小阻力。平台上设有钻井设备、器材和生活楼等。平台上甲板高出水面一定高度，以免上浪，影响作业。下浮体或浮箱提供主要浮力，沉没于水下以减小波浪载荷。平台上甲板与下浮体之间连接的立柱，具有小水线面的剖面，主柱与主柱之间相隔适当距离，以保证平台的稳性，所以该类平台又有立柱稳定式平台之称。



图 1-1 典型深水半潜式钻井平台效果图

## 1.2 深水钻完井双层管柱系统简介

海洋油气开发深水钻井系统与地层测试系统结构，如图 1-2 所示。

海平面以上为半潜式钻井平台(或深水钻井船)<sup>[2,3]</sup>，海平面和泥线之间与海水直接接触的是隔水管柱及防喷器等井口装置，在隔水管柱内部则是用于钻井作业的钻柱或者是用于地层测试的测试管柱工具串。外部隔水管的主要作用是隔离海水、引导钻具、形成钻井液循环流道及支撑各种控制管线(节流、压井等)；钻柱则是由钻铤、加重钻杆、钻杆等管柱组成的管串；测试管柱则是由流动头、水下安全阀、水下测试树、DST 测试工具、封隔器、TCP 射孔工具组合及用于连接的油管等组成的工具串结构。由图 1-2 可知，深水钻井时，钻柱和测试管柱是通过隔水管系统进入地层进行钻井或者是测试作业。在隔水管段，即平台与海底防喷器组之间为隔水管和钻柱或者测试管柱等钻完井管柱组成的双层管柱，其中隔水管为外层管柱，钻柱或者测试管柱等钻完井管柱为内层管柱。在

海洋环境载荷及平台运动下，外层隔水管会与内层钻完井管柱发生接触碰撞，进而产生耦合作用，大大降低隔水管与钻完井管柱的安全性。

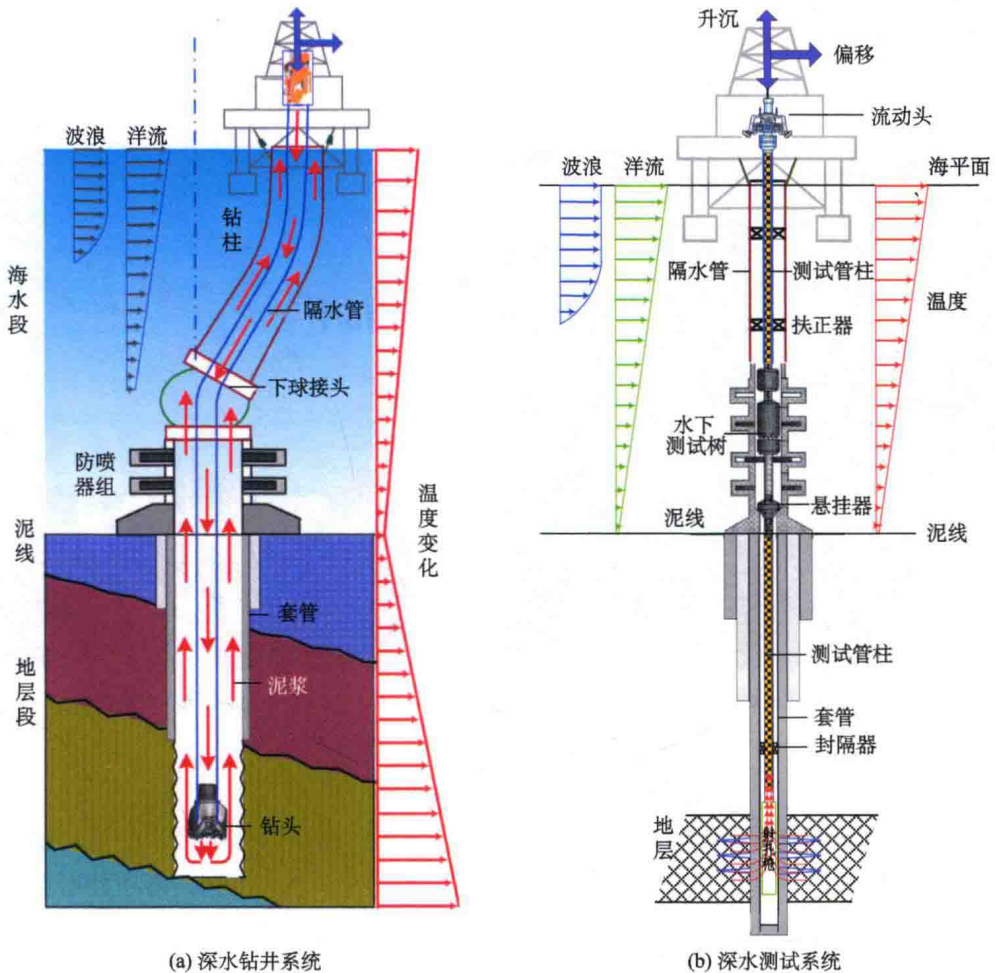


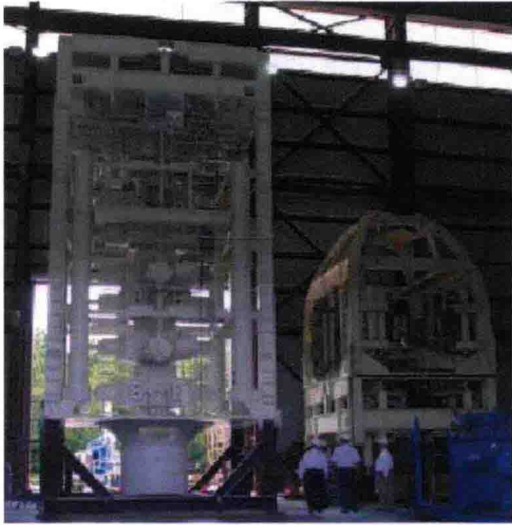
图 1-2 深水钻完井双层管柱系统

### 1.3 海底防喷器系统简介

防喷器是井控设备中的核心设备，用于控制井口压力，实现近平衡或欠平衡压力钻井，提高钻井速度及质量。在钻井作业中，一旦发生溢流、井涌、井喷等紧急情况，操作人员应立即发出关井指令，防喷器应迅速启动关井。此时防喷器一旦失效，将导致井喷等恶性事故，造成设备损坏和人员伤亡。因此，防喷器是保证钻井作业顺利进行和人身安全的关键设备之一。

海底防喷器系统<sup>[4]</sup>(图 1-3)是海洋石油钻井行业水下器具的部件之一，是设置在海

底、用来控制和防止井喷的一种井口设备。通常它有几个闸板式防喷器、囊式防喷器，还配有两套带控制阀组的压井或放喷管线及控制全套水下器具的两套控制阀组。海底防喷器组除了要求能够承受高压油、气层的压力以外，因为处在不能直接观察的条件下进行工作，所以其性能必须绝对可靠。深海抢险、逃生和救援极为困难，因此对深水防喷器组及其控制系统的技术性能和可靠性要求非常高。



(a) Hydril水下防喷器组



(b) Cameron 水下防喷器组

图 1-3 海底防喷器系统

目前，深水防喷器组控制系统的生产制造技术集中在少数外国公司手里，基本被垄断。国外的防喷器产品主要有两种控制形式：液压控制和电液控制。液压控制系统成本低、工作可靠、防爆性能好、技术相对成熟，但响应时间比较长。目前多适用于近距离和浅水钻井防喷器控制。电液控制采用电源及电气控制元件和电传感元件，先导控制时间短，从而缩短了防喷器开、关所需的时间，适合于远距离控制。电液控制系统根据电信号的传输方式，可以划分成单路电液控制系统和多路电液控制系统。所谓的单路控制是指每一个水下电磁阀在平台控制柜上都有一个与其对应的、独立的电信号传输路径。一个多芯的电缆可以提供多个信号传输路径，而电缆的铠装就作为通常的接地回路。如果水下的需求功能点特别多，就需要有足够多的电缆来传输控制信号。功能越多，控制电缆的直径越大，缠绕电缆的滚筒的直径就越大，生产制造的成本也越高。平台控制柜通过一根光缆或者通信电缆来传输全部的控制信号。控制信号经过平台上的多路控制系统连续化和编码后，通过光缆或者电缆传输到水下控制箱，水下控制箱内的电子模块将信号先后进行解码。与单路电液控制系统相比，多路控制系统的控制电缆或者光缆的数量减少许多，下放电线的滚筒的体积也相应减少，从而节约一定的成本。此外，多路控制系统的电液控制的优点为响应速度快，电信号的传输时间几乎是一瞬间完成的，而

液压信号的传输则需数秒甚至数十秒，水深越深，电液控制系统可以节省的时间就越多。

目前，陆地钻井由于控制距离不是很远，国内仍普遍采用技术已较成熟的气-液控制方式，而国外现已大量采用电-液控制系统。对于海洋钻井，特别是深水钻井，电-液控制防喷器已成为首选方案，在世界范围内得到广泛应用。特别是随着海洋钻井不断向深水区拓展，深水防喷器控制系统的研制与开发受到了国内外的普遍关注。

## 1.4 深水浮式平台-管柱-防喷器系统面临的问题

浮式平台、钻完井管柱、海底防喷器在深水钻井中是一个系统组成，三者构成了深水钻井中海水段的一个整体(图 1-4)。然而，国内外油气公司因浮式平台、钻完井管柱、海底防喷器问题均发生过诸多重大事故。浮式平台、钻完井管柱、海底防喷器(井控装备)也是超深水油气开发面临的三大主要安全问题。

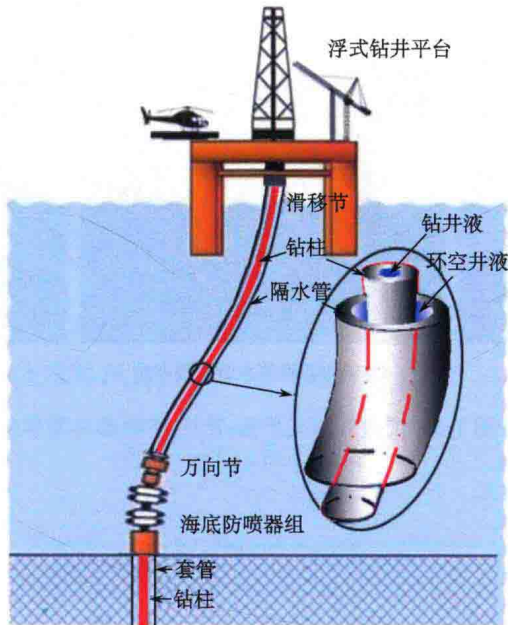


图 1-4 深水浮式平台-管柱-防喷器系统示意图

海上浮式平台在海上作业，受到波浪作用，不断变化的波浪载荷使得结构内部产生不断变化的循环应力。由这些循环应力造成的疲劳损伤是船舶及海洋工程结构的一种主要的破坏形式。1981 年，结构的疲劳损伤造成 Alexander Keyland 号半潜平台在北海沉没，成为海洋工程领域有史以来最严重的事故之一。平台一旦发生事故，将会造成各个方面非常严重的后果，包括恶劣的环境污染、巨大的经济损失、人员伤亡、地缘政治危机及其他相关的社会问题。在设计中保证结构有足够的疲劳强度，对船舶及海洋工程结

构的安全性是十分重要的。

挪威科技工业研究院(SINTEF)统计 1980~2010 年,共发生海上井喷事故 237 次,其中探井 81 次,开发井 62 次,占总事故 60.4%。例如,2009 年 PTTEP 澳大利亚平台井喷事故、2010 年 BP 墨西哥湾事故、2011 年雪佛龙巴西漏油事故、2012 年雪佛龙尼日利亚井喷平台沉没事故等几起重大海上钻井事故。2010 年 4 月 20 日, BP 在墨西哥湾的 Macondo 井发生井喷爆炸,36h 后钻井平台“深水地平线”沉没,地层油气通过井筒和防喷器(BOP)持续喷出 87 天。事故造成 11 人失踪、17 人受伤,泄漏到墨西哥湾中的原油超过了 400 万桶,墨西哥湾深水地平线半潜平台倾覆漏油造成的直接间接经济损失超过 1000 亿美元,成为美国历史上最严重的漏油事件。

深水钻完井包括隔水管、钻柱、完井管柱及测试管柱等。它们在海洋中属于细长柔性管柱,海洋环境极其恶劣,会导致管柱弯曲变形,易发生事故。2006 年, LW3-1-1 井钻井液作业时,受台风影响,座在转盘上的隔水管从转盘面下折断,52 根隔水管及防喷器组落海。2009 年, LH34-2-1 井作业时,受台风影响,进行撤离,隔水管底部总成碰撞海床。两次事故均造成了严重的经济损失。浮式平台-管柱-防喷器典型事故如图 1-5 所示。



(a) 巴西P-36号浮式平台翻沉



(b) 南中国海隔水管断裂事故



(c) 深水地平线号防喷器失效井喷

图 1-5 国内外浮式平台-管柱-防喷器典型事故

## 第 2 章

# 环境载荷计算方法

## 2.1 风载荷计算方法

浮式平台的上层建筑较复杂，水面以上暴露于空气中的面积比较大，具有较大的风倾力矩。并且，由于浮式平台的水线面面积相对较小，再加上浮式平台具有较高的重心垂向位置，使得其复原力矩相对较小。因此，风载荷对于浮式平台的运动响应有着至关重要的影响<sup>[5]</sup>。

风载荷通常可通过风洞试验进行精确测量，但其花费大、耗时耗力，因此船舶与海洋结构物的数值分析中，通常将风力及风力矩表达为

$$F_{xw} = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_{wR}^2 A_T \quad (2-1)$$

$$F_{yw} = \frac{1}{2} C_{yw} \rho_w V_{wR}^2 A_L \quad (2-2)$$

$$M_{xyw} = \frac{1}{2} C_{xyw} \rho_w V_{wR}^2 A_L L_{pp} \quad (2-3)$$

式中， $V_{wR}$  为海平面以上 10m 处的相对风速，m/s； $A_T$  为首向受风面积， $m^2$ ； $A_L$  为测向受风面积， $m^2$ ； $L_{pp}$  为两柱间长，m； $\rho_w$  为空气密度，当气温为 20℃ 时，取  $\rho_w = 1.224 \times 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$ ； $F_{xw}$ 、 $F_{yw}$  和  $M_{xyw}$  分别为纵向风力、横向风力和首摇风力矩； $C_{xw}$ 、 $C_{yw}$  和  $C_{xyw}$  分别为纵向、横向和首摇风力矩系数。

## 2.2 流载荷计算方法

海洋中的流有很多种类型，如海流、潮流、洋流、密度流和环流等。由于海流的变化比较缓慢，在对海洋平台的数值分析中常将其视作稳定的流动。作用于平台上的流载荷由流作用力  $F_{\text{current}}$  和力矩  $M_{\text{current}}$  组成，同样具有分量  $F_{xc}$ 、 $F_{yc}$  和  $M_{xyc}$ ，其一般表达式为

$$F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c V_{cR}^2 T L_{pp} \quad (2-4)$$

$$F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_c V_{cR}^2 T L_{pp} \quad (2-5)$$

$$M_{xyc} = \frac{1}{2} C_{xyc} \rho_c V_{cR}^2 T L_{pp}^2 \quad (2-6)$$

式中， $V_{cR}$  为平均相对流速，m/s； $T$  为平均吃水，m； $L_{pp}$  为两柱间长，m； $\rho_c$  为海水密度，当气温为 20℃ 时，取  $\rho_c = 1.224 \times 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$ ； $F_{xc}$ 、 $F_{yc}$  和  $M_{xyc}$  分别为纵向流力、横向流力和首摇流力矩； $C_{xc}$ 、 $C_{yc}$  和  $C_{xyc}$  分别为纵向流力系数、横向流力系数和首摇流力矩系数。

## 2.3 波浪力计算方法

### 2.3.1 波浪理论

#### 1. 自由面波浪的边界值问题(BVP)

表面波浪理论经过一个多世纪的发展，经历了以线性波(Airy 波)、斯托克斯波(Stokes)、椭圆余弦波等为代表的波浪模型<sup>[6,7]</sup>。Stoker(1968 年)和 Lighthill(1978 年)给出了表面波的细化处理。该问题的推导始于边界值问题的建立，忽略了流体的黏性效应，以流体的速度势  $\Phi(x, y, z)$  来描述流体的属性，包含了速度和流体压力：

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (2-7)$$

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\Phi_x^2 + \Phi_y^2 + \Phi_z^2) \quad (2-8)$$

式中， $u$ 、 $v$ 、 $w$  为笛卡儿坐标系下流体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的速度分量。式(2-8)为 Bernoulli 方程，描述的是压力  $p$  在密度为  $\rho$  的流体域内与流体速度和速度势变化率的关系。

对不可压缩、无黏、无旋的连续流体，其控制方程可通过 Laplace 方程来描述：