

## 深水钻井喷射下导管模拟试验装置的研制

柯 珂<sup>1</sup>, 张 辉<sup>1</sup>, 周宇阳<sup>2</sup>, 王 磊<sup>1</sup>, 冯士伦<sup>3</sup>

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

**摘 要:**深水钻井下喷射导管的钻井参数与陆地及浅水钻井存在较大不同。为了模拟喷射下导管过程, 为深水钻井喷射下导管作业参数计算提供试验数据, 根据深水喷射下导管的特点, 以其工具及组合形式为基础, 结合土力学基础理论, 研制了深水钻井喷射下导管模拟试验装置。该装置主要由土箱、管柱系统、起吊系统、循环系统、加载系统和测量系统组成, 可以模拟喷射下导管全过程, 通过改变模拟试验中的喷射参数和岩土性质, 并对导管的下入速率、承载能力(横向应变、竖向应变及承载能力)进行测量, 进而可以研究深水钻井导管喷射作业过程当中, 不同岩土性质条件下的喷射参数与导管下入速度和承载能力之间的相互关系和影响规律, 建立导管作业参数优化设计方法, 为深水油气钻探中导管喷射下入的优化设计提供参考。

**关键词:**深水钻井 喷射 导管 试验装置 模拟试验 优化设计

**中图分类号:** TE5245 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2015)02-0033-05

## The Development of Testing Simulators for Conductor Jets Running in Deepwater Drilling

Ke Ke<sup>1</sup>, Zhang Hui<sup>1</sup>, Zhou Yuyang<sup>2</sup>, Wang Lei<sup>1</sup>, Feng Shilun<sup>3</sup>

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China)

**Abstract:** Conductor jets running in deepwater drilling have different drilling parameters from that of land or shallow water drilling. In order to simulate the deepwater conductor jet running process, and provide experimental data for calculating operation parameter of conductor jetting running, a new simulating device for conductor jet running in deepwater drilling has been developed according to characteristics of deepwater conductor jet running, combined basic theory of soil mechanics with the form of running tool assembly. This device mainly consists of a soil box, pipe string, hoist, circulating loop, loading and measuring systems. It can simulate the whole process of conductor jet running. By changing the jet parameters and the geotechnical properties in the simulation test, the running speed of the conductor and bearing capacity, including the horizontal and vertical strain as well as the bearing capacity, can be measured, so as to study the relationship among jet parameters, the conductor running speed and bearing capacity during the course of conductor jet running for deepwater drilling under different geotechnical properties, develop a optimization design for conductor operation parameters, and provide a reference for the optimization design of conductor jets running in deepwater drilling of oil and gas well.

**Key words:** deepwater drilling; jetting; conductor; testing simulator; simulation test; optimization design

深水钻井作业风险大、费用高<sup>[1-2]</sup>。目前, 深水钻井导管井段所采用的喷射下导管钻井的基本工艺流程为<sup>[3]</sup>: 将喷射钻具组合(由钻头和动力钻具组成)置于导管内部, 并与导管送入工具相连, 钻头位于导管内部或伸出导管鞋一定长度; 当导管到达泥线处时, 依靠其自身的重量钻入地层中, 并开泵驱动动力钻具使钻头旋转, 循环钻井液将岩屑从导管与

**收稿日期:** 2014-08-25; **改回日期:** 2015-03-02。

**作者简介:** 柯珂(1982—), 男, 湖北宜昌人, 2004年毕业于石油大学(华东)石油工程专业, 2010年获中国石油大学(华东)油气井工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事井身结构设计和深水钻井关键技术方面的研究。

**联系方式:** (010)84988103, keke.sripe@sinopec.com。

**基金项目:** 中国石化科技攻关项目“琼东南深水钻井关键技术方案研究”(编号: P13010)资助。

钻柱的环空返出井筒;当导管下至设计深度时,静止一定时间,使导管与地层黏土之间建立足够的胶结强度,满足后续作业导管的承载要求。该作业方式节省了固井和一趟起下钻时间,较大地提高了深水钻井前期的作业效率并节约了作业成本,因此逐渐成为深水钻井下导管的主流作业方式。导管喷射钻井参数选取得合理与否,直接决定了导管井段钻井质量的高低,因此研究导管井段无隔水管喷射钻进参数与导管承载能力的相互作用规律,对喷射下入参数的优化设计具有重要意义。近年来,国内也建立了一些室内模拟试验装置<sup>[4-5]</sup>,但这些装置模拟行程过短(不超过1.0 m),测量参数的种类和模拟精度有限,无法满足模拟试验的需要。为此,笔者根据深水钻井喷射下导管作业的特点<sup>[6-7]</sup>,建立了专门模拟导管喷射下入的试验系统,该系统可通过改变模拟试验中的喷射参数(包括喷嘴尺寸、排量、射流速度等)、岩土(黏土、砂土、互层土等)性质,对导管下入速率、承载能力(横向承载能力和竖向承载能力)进行测量,以期对导管喷射下入作业参数的优化设计提供试验依据。

## 1 试验装置组成与参数

### 1.1 试验装置整体结构

深水喷射下导管钻井模拟试验装置主要由土箱、管柱系统、起吊系统、循环系统、加载系统和测量系统组成,如图1所示。

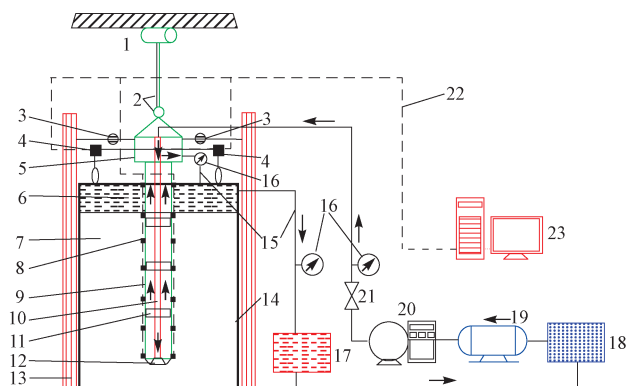


图1 深水喷射下导管钻井模拟试验装置

Fig.1 Testing simulator for conductor jetting and running in deepwater drilling

1. 起重天车;2. 吊缆及测力计;3. 横向液压加载装置及位移传感器;
4. 拉绳位移传感器;5. 承载箱体;6. 水;7. 试验用土;8. 应变片;
9. 模拟导管;10. 模拟钻杆;11. 稳定器;12. 钻头;13. 剪力墙;
14. 试验土箱;15. 管线;16. 流量计;17. 污水箱;18. 污水过滤装置;
19. 清水罐;20. 变频控制柱塞泵;21. 阀门;22. 数据传送电缆;23. 数据记录及处理系统

该试验装置中,各主要部件所起的作用分别是:由起重天车和吊缆及测力计构成的起吊系统,负责起吊由模拟导管、模拟钻杆、稳定器和钻头组成的管柱系统;试验土箱用以填放试验用土和水,模拟海底环境;拉绳位移传感器可以精确测量模拟导管下入的距离或者深度与时间的关系,从而计算出模拟导管的下入速度;承载箱体用以盛放加载砝码,模拟导管施加的竖向载荷,从而模拟深水钻井导管承受水下井口、表层套管等引起的载荷;横向液压加载装置及位移传感器结合剪力墙,用以给模拟导管顶部施加的横向载荷并对模拟导管顶部的横向位移进行测量,从而模拟深水钻井导管顶部或水下井口受到由洋流、隔水管运动所施加的横向载荷;沿模拟导管壁上贴有应变片,用以测量加载过程中导管不同部位的变形量;管线用以循环模拟装置中的流体;流量计用以测量不同位置流体的流量;污水箱用以存放喷射下入过程中循环出的流体,污水箱出口带有简易的过滤栅,用以过滤从土箱循环出的流体中较大砂粒;过滤装置用以进一步过滤流体中的固体杂质及颗粒,为下一步注入到模拟钻杆中做好准备;清水罐用以存储过滤后的清水或重新输入的清水;变频控制柱塞泵可以以不同的排量向模拟钻柱内注入流体;阀门用来控制流动管线的开启和闭合;数据传送电缆用以将各种位移传感器和应变片上的数据传输到数据记录及处理系统中,方便记录、转化和分析各类试验数据。

### 1.2 技术参数

#### 1.2.1 土箱

试验土箱为高4.2 m、直径1.0 m的铁箱,土箱中的土样深度为4.1 m。因为试验中土箱里盛放土和水模拟海底环境,故土样上部有0.1 m深的水。

#### 1.2.2 管柱系统

管柱系统包括导管、钻杆及钻头。其中,导管长4.0 m,沿导管长度方向设置7对电阻应变片。

钻杆为直径3.0 cm的金属管,顶端通过螺纹与导管连接,在钻杆距下端0.2 m及3.0 m位置处焊接了4个金属叶片,以保证钻杆在导管内居中。钻杆下端通过螺纹与简易刮刀钻头相连。

刮刀钻头主要使用5种尺寸的喷嘴,分别为1.5、2.0、2.5、3.0和3.5 mm。通过更换不同尺寸的喷嘴和改变排量,可实现射流参数的变化。

在装配模拟导管和钻杆时,将钻杆伸出导管 3~4 cm,使射流恰好作用于导管下端临近的位置。

### 1.2.3 循环系统

循环系统由柱塞泵及循环管线组成,柱塞泵额定排量为  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ ,额定泵压为 15 MPa。为实现射流排量的变化,给柱塞泵配置了变频控制柜,可实现出口排量在  $0\sim 6 \text{ m}^3/\text{h}$  范围内的无级调速控制。

试验以清水为循环介质。清水由柱塞泵通过循环管汇入钻杆,从钻头喷出后,大部分由内外管柱之间的环空上返,少量流体通过外管柱与地层的间隙返出。

### 1.2.4 加载系统

加载系统主要包括竖向加载和横向加载系统,如图 2 所示。通过千斤顶对导管施加竖向及横向压力,并通过千斤顶及压力传感器分别采集压力数值。

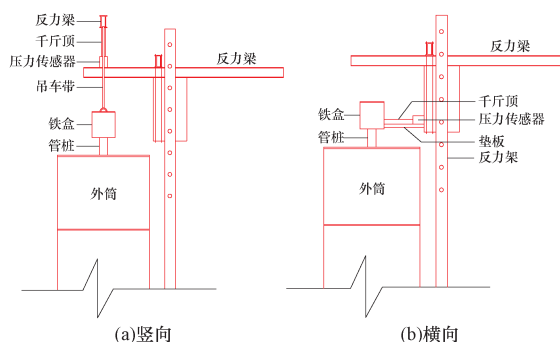


图 2 竖向及横向加载系统

Fig. 2 Horizontal and vertical loading system

### 1.2.5 测量系统

测量系统主要包括压力、位移测量(见图 3)及应变测量,通过多通道数据采集仪记录并实时显示和输出测量数据,采样频率为 1 Hz。

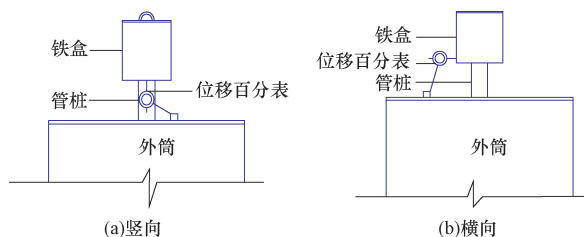


图 3 竖向及横向位移测量系统

Fig. 3 Vertical and horizontal displacement measurement system

压力测量系统用于在导管加载过程中测量施加在导管上的竖向及横向压力载荷,并通过多通道数

据采集仪记录并输出数据。压力测量通过千斤顶及压力传感器两种方式分别获取数据,压力传感器的测量范围为  $24.5\sim 9\,800.0 \text{ N}$ ,测量精度为  $24.5 \text{ N}$ 。

位移测量包括拉绳位移传感器和位移百分表。拉绳位移传感器测量导管的下入速度,测量范围为  $0\sim 5.0 \text{ m}$ ,测量精度  $0.1 \text{ mm}$ 。位移百分表测量导管端部在竖向及横向载荷作用下的位移量,量程为  $50.0 \text{ mm}$ ,测量精度  $0.1 \text{ mm}$ 。位移测量结果通过多通道数据采集仪记录并输出。

应变测量通过设置在导管外壁的应变片进行测量,并由多通道数据采集仪记录并输出。

### 1.2.6 几何参数选择依据

导管喷射下入模拟试验装置几何参数的选择依据:实际导管外径  $914.0 \text{ mm}$ ,内径  $838.0 \text{ mm}$ ,模型与实际导管的尺寸比例为  $1:10$ ,同时考虑到现有钢管规格的尺寸,模型导管选择外径  $102 \text{ mm}$ 、内径为  $94 \text{ mm}$  的钢管;考虑到沉桩的边界效应(一般为桩径的  $3\sim 7$  倍),选择直径  $1.0 \text{ m}$ 、深度  $4.2 \text{ m}$  的圆柱形试验土箱,模型导管的下入深度控制在  $3.0\sim 3.5 \text{ m}$ 。

## 2 工作原理与主要功能

### 2.1 土样制备

为模拟海底浅部地层条件,使试验土样的物理力学性能与海底浅部土层相近<sup>[8]</sup>,消除试验所用土样经过取土时的扰动以及储存和运输过程中对试验土样力学性质的影响,需要对其进行一定的处理,主要包括筛选、水饱和、振捣、压实等步骤,使土样均质、饱和并达到一定的强度要求。处理过程为:1)去除杂物,初选试验用土,将大块岩石、砂砾等挑出,同时打碎胶结的成块土样;2)分层填置、加水、振捣、加压;3)静置存放,静置时间为一周,等待土壤排水固结,在等待过程中始终使用大型重物对土样加压,以模拟海底的情况;4)单次试验后,均采用振捣方式振捣  $15 \text{ min}$ ,之后静置  $24 \text{ h}$ ,保证土壤力学和物理特性保持基本一致。

### 2.2 模拟原理

深水喷射下导管钻井模拟试验装置模拟导管喷射下入过程的工作原理为:将模拟钻杆、稳定器、钻头分别通过螺纹连接组装在一起,然后将其放入模



拟导管内,通过接头与模拟导管和承载箱体固定成一个整体。用起吊系统将由模拟钻杆和模拟导管等组成的管柱系统吊起,使管柱系统完全在土箱上方并保持垂直状态,拉绳感应传感器此时开始记录导管承载箱体和土箱顶部的距离。随后启动变频柱塞泵,将清水罐中的清水通过管线和阀门从模拟钻杆内注入,再经管线由试验土箱、污水箱、过滤装置重新回到清水罐,从而模拟导管喷射下入过程中的海水或海水基钻井液的循环过程;控制起重天车,将管柱系统逐渐放入土箱的试验用土中,用测力计记录下放的重量,以模拟深水钻井导管下入及钻压控制的过程;模拟导管下入到位后,通过向承载箱体内部放入指定重量的砝码给模拟导管施加竖向载荷,通过横向加载装置给模拟导管顶部施加横向载荷,以模拟深水钻井导管喷射下入后所受到的来自水下井口、套管及隔水管所施加的竖向、横向载荷。试验过程中试验流体的循环路线如图1中箭头所示。

### 2.3 装置的主要功能

1) 能够模拟导管喷射下入过程,研究不同水力参数对导管下入及承载能力的影响规律。通过协调该试验装置的各系统,可以较好地模拟导管喷射下入过程,通过改变试验装置中泵的排量、变换钻头喷嘴尺寸等参数,可以模拟导管喷射下入过程中不同水力学参数(即喷射下导管的排量和射流速度)对导管下入速度的影响;通过改变下入过程中起重天车的承载,可以模拟导管喷射下入过程中施加不同的钻压。此外,试验过程中通过测量模拟管柱在下入后的沉降及应力数据,可以分析实际过程中不同作业参数对导管最终承载能力的影响规律。

2) 能够模拟导管承受动态载荷条件,研究导管所受载荷随深度的变化规律。该试验装置在模拟管柱系统的顶部具有纵向和横向载荷施加系统,与应力测量与数据处理系统配合,可以模拟深水钻井中导管下入后,在悬挂套管、隔水管等时导管的横向和竖向承载能力,有助于研究导管下入后在后续钻井工况下的管柱应力分布状态以及承载能力。

3) 能够模拟不同岩土条件下的导管喷下入过程。通过改变土箱内岩土的类型及夯实程度,可以模拟导管在不同种岩土类型、不同岩土强度条件下的导管喷射下入过程,从而有助于研究不同岩土环境下导管喷射下入作业参数对导管下入速度等的影响规律,有助于提出针对不同种岩土环境的导管喷射作业参数优化设计方法。

## 3 性能测试及模拟试验

### 3.1 性能测试

深水喷射下导管钻井模拟试验装置于2012年完成整体设计与组装,分别于当年10月和11月进行了整体测试,在测试过程中重点控制试验流体必须从模拟管柱内管和外管的环空中返出,而不能从外管和岩土间的间隙中返出。在整个测试过程中,试验装置的每个系统都运转正常,数据传输连续准确。

### 3.2 模拟试验

深水喷射下导管钻井模拟试验装置在完成性能测试后进行了数次导管喷射下入模拟试验,试验土样分别为曹妃甸海底黏土和砂土。往土箱中填充土样时,采取分层处理的方法,每层土样模仿实际钻井过程中不同深度处的岩土参数。土样测试结果见表1、表2(试验土层1、2、3、4其深度依次增加,渗透系数为20℃条件下的数据)。

表1 砂土的基本物理力学参数测试结果

Table 1 Test results for basic physical and mechanical parameters of sand-soil

| 试验土层 | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 含水率, % | 饱和度, % | 粘聚力/<br>kPa | 内摩擦角/<br>( $^{\circ}$ ) | 渗透系数/<br>( $10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|------|--------------------------------------------|--------|--------|-------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| 1    | 2.06                                       | 20.59  | 100    | 11.5        | 31.0                    | 8 437.396                                            |
| 2    | 2.07                                       | 19.44  | 100    | 15.4        | 22.5                    | 1 245.749                                            |
| 3    | 2.02                                       | 21.00  | 100    | 4.8         | 21.6                    | 11 870.589                                           |
| 4    | 2.07                                       | 20.19  | 100    | 5.3         | 23.4                    | 14 222.172                                           |

表2 黏土的基本物理力学参数测试结果

Table 2 Test results for basic physical and mechanical parameters of clay

| 试验土层 | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 含水率, % | 饱和度, % | 粘聚力/<br>kPa | 内摩擦角/<br>( $^{\circ}$ ) | 渗透系数/<br>( $10^{-7} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) |
|------|--------------------------------------------|--------|--------|-------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| 1    | 1.82                                       | 30.53  | 100    | 11.8        | 17.6                    | 73.8                                                 |
| 2    | 1.84                                       | 33.70  | 100    | 11.6        | 18.1                    | 62.5                                                 |
| 3    | 1.84                                       | 33.23  | 100    | 12.6        | 19.0                    | 42.0                                                 |
| 4    | 1.85                                       | 32.26  | 100    | 13.0        | 20.4                    | 20.2                                                 |

模拟试验主要测量分析了导管下入速度与喷射参数的相互关系,并分析了导管顶部在一定横向载荷条件下全管柱的载荷应变分布情况。具体试验步骤为:1)更换好钻头喷嘴,用起重天车把导管直立吊起至试验土层上方、土箱中间位置处;2)控制大钩使管柱匀速缓慢下沉入泥,管柱入泥后前1.0 m不开泵;3)下入过程中,以拉绳位移传感器测量管柱的下

沉速度;4)管柱入泥 1.0 m 后开泵,开泵时先用小排量,逐渐增大至设计排量值;5)缓慢释放大钩,使管柱在自重及射流联合作用下逐渐下沉,注意在下放过程中保持匀速,并尽量保证管柱下入的垂直性;6)管柱下入到标记位置后,停泵,并用大钩吊住管柱静止 20 min;7)释放大钩,观察管柱是否发生沉降;8)静置管柱恢复 4 h 之后,对管柱进行承载力测试;9)在导管顶部施加向上的力,以位移 40.0 mm 作为标准,测试导管在轴向载荷作用下的变形及位移情况;10)在导管顶端固定位置处施加横向推力,以位移 40.0 mm 作为标准,测试导管在横向载荷作用下的变形及位移情况;11)拔出导管,测量拔出导管的力。重新整理土样,更换试验参数,按上述步骤重复试验。部分试验结果如图 4 所示。

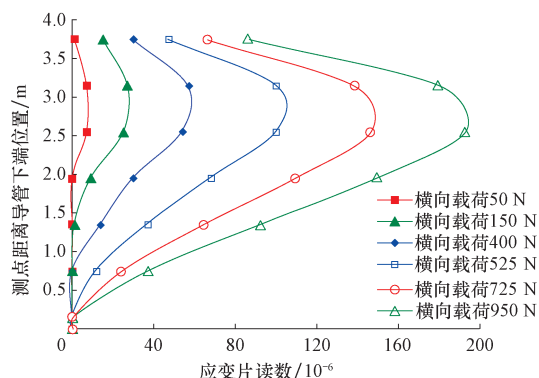


图4 横向载荷作用下应变沿管柱轴向的分布规律

Fig. 4 Distribution regularity of strain along axial direction of string under transverse loads

## 4 结 论

1) 深水喷射下导管钻井模拟试验装置,可通过模拟深水喷射下导管钻井环境和作业流程,进而为研究深水喷射下导管作业参数的优化设计方法提供平台。

2) 试验装置整个管柱的最大行程可达 4.0 m,能够较好地模拟下入过程中不同参数对下入过程的影响,土箱具备足够的高度和体积,可以依据实际土层情况分层处理和充填不同参数的土样,以更好地模拟实际情况。

3) 试验装置可以在试验全过程中对试验参数进行精细调整,并对下入速度、位移、载荷等参数进

行全程连续的监测、记录和处理,可以有效服务于相关设计方法的提出和验证工作。

4) 虽然该试验装置试验压力未能达到深水海底环境具有的数十兆帕级别,但研究表明,深水海底土中水压力与静水压力相同,根据土力学有效应力原理,海水压力大小对土的强度参数没有明显影响,因此该试验装置能够较好地模拟导管喷射下入过程,试验结果能够对实际喷射作业参数的优化设计起到较好的验证与修正作用。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 路保平,李国华. 西非深水钻井完井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(3): 1-6.  
Lu Baoping, Li Guohua. Key technologies for deepwater drilling & completion in West Africa[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3): 1-6.
- [2] 顾纯巍,张勇,郭永宾,等. 接箍对海上隔水导管打桩的影响[J]. 断块油气田, 2013, 20(4): 543-544.  
Gu Chunwei, Zhang Yong, Guo Yongbin, et al. Influence of coupling on conductor piling at sea[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(4): 543-544.
- [3] 周俊昌,付英军,朱荣东. 深水钻井送入管柱技术及其发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(6): 1-7.  
Zhou Junchang, Fu Yingjun, Zhu Rongdong. Design method and development of landing strings in deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(6): 1-7.
- [4] 杨进,刘书杰,周建良,等. 深水石油钻采工程模拟实验装置的研制[J]. 石油机械, 2011, 39(8): 1-3.  
Yang Jin, Liu Shujie, Zhou Jianliang, et al. Deepwater petroleum drilling and production simulation system[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(8): 1-3.
- [5] 徐荣强,陈建兵,刘正礼,等. 喷射导管技术在深水钻井作业中的应用[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 19-22.  
Xu Rongqiang, Chen Jianbing, Liu Zhengli, et al. The application of jetting technology in deepwater drilling[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 19-22.
- [6] Jeanjean P. Innovation design method for deepwater surface casings[R]. SPE 77357, 2002.
- [7] Gerwick B C Jr. Construction of marine and offshore structures [M]. Boca Raton: CRC Press, 2007: 49-55.
- [8] 张克恭,刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 167-169.  
Zhang Kegong, Liu Songyu. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 167-169.

[编辑 令文学]