

海洋钻井钻柱升沉补偿系统分析

秦如雷, 许本冲, 王嘉瑞

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:随着海洋资源勘探开发由浅海到深海逐渐增多,深水钻井面临的难题也不同于陆地与浅水,如何在随着波浪起伏的钻井平台上保持钻压稳定,钻柱升沉补偿系统应运而生。钻柱升沉补偿系统应用于浮式钻井平台或钻井船,在船受风浪影响起伏颠簸时可以使钻柱保持相对静止,使钻头与孔底保持持续接触,钻压保持基本恒定,起到保护钻具,提高钻进效率的作用。本文介绍了升沉补偿系统的发展阶段和常用升沉补偿系统结构及优缺点,通过示意图说明了主动补偿系统、被动补偿系统和主被动一体式补偿系统的工作原理。同时通过实例与数据说明升沉补偿系统在提高钻速和岩心采收率方面的积极作用。

关键词:海洋钻井;钻柱;升沉补偿;波浪补偿

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)01-0022-06

Analysis of drill string compensation system for offshore drilling

QIN Rulei, XU Benchong, WANG Jiarui

(The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: With the exploration of deep-sea resources increasing gradually, drilling is facing new difficulties. The drill string compensation system is applied to stabilize the floating drilling platform or drilling ship. The system can keep the drill string in a relative static position and protect it from jolting caused by wind and waves, thus allowing the drill bit in constant contact with the hole-bottom, and the bit pressure basically constant. It plays a role in protecting drilling tools and improving drilling efficiency. This paper introduces the advances of the compensation systems, as well as the structure, principle, advantages and disadvantages of various systems. Field cases and data are presented to demonstrate the benefits of the compensation system in improving drilling rates and core recovery.

Key words: offshore drilling; drill string; compensator; wave compensation

0 引言

受波浪起伏影响,浮式钻井平台在工作中,有横摇、纵摇、升沉三个方向的震荡运动。其中与钻井关系最为密切的,是平台的升沉运动。平台的上下升沉会带动钻头做相应的运动,这就会使钻头与孔底不能保持稳定的接触,施加在钻头上的钻压不稳定、不可控,钻井质量无法满足技术要求。升沉幅度过大还会导致钻头及下部钻具组合由于超压而降低寿命。

欧美等技术发达国家已有少数公司能够生产解

决上述问题的核心装备——钻柱升沉补偿系统。而我国由于工业,尤其在海工准备领域基础条件薄弱,目前在该领域的研究尚处于起步阶段。通过对常用的钻柱升沉补偿系统进行结构、原理及应用分析,为工程技术人员选用或开发相关设备提供技术基础。

国外钻井公司曾开发过伸缩钻杆来补偿钻柱升沉运动的行程,但是伸缩钻杆密封与强度问题都使其使用效果差强人意。随着海洋钻井技术与装备的进步,升沉补偿系统取代了伸缩钻杆,其结构形式有天车式、游车式等多种形式,均是基于被动式和主动

收稿日期:2018-12-07; **修回日期:**2018-12-14 **DOI:**10.12143/j.tkgc.2019.01.004

基金项目:地质调查项目“海域天然气水合物资源试采工程实施(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号:DD20189601)

作者简介:秦如雷,男,汉族,1987年生,地质工程专业,硕士,主要从事钻探新技术、新设备新工艺的研发工作,河北省廊坊市金光道77号, qin-rulei@foxmail.com。

通信作者:王嘉瑞,女,汉族,1992年生,机械设计专业,主要从事钻探新技术、新设备、新工艺的研发工作,河北省廊坊市金光道77号, 1056031658@qq.com。

引用格式:秦如雷,许本冲,王嘉瑞.海洋钻井钻柱升沉补偿系统分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):22-27.

QIN Rulei, XU Benchong, WANG Jiarui. Analysis of drill string compensation system for offshore drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Drilling and Tunneling), 2019,46(1):22-27.

式 2 种基本原理开发。被动钻柱升沉运动补偿系统的出现极大地解决了浮式钻井平台升沉运动引起的钻井问题。但是被动补偿系统属于后发系统,补偿响应在波浪之后,补偿精度受钩载影响大,浅水或浅井使用时补偿精度不高。20 世纪 90 年代,钻井装备厂商研制出了主动升沉补偿系统,这是一种基于电脑控制、液压响应的闭环补偿系统,弥补了被动补偿的不足,补偿精度大大提高。

1 升沉补偿系统的结构形式

钻柱升沉补偿系统按结构形式可分为天车式、游车式、死绳式、绞车式和主缸式,其结构如图 1~5 所示。每种补偿系统的概况与特点见表 1。



图 1 天车补偿

Fig.1 Crown compensation

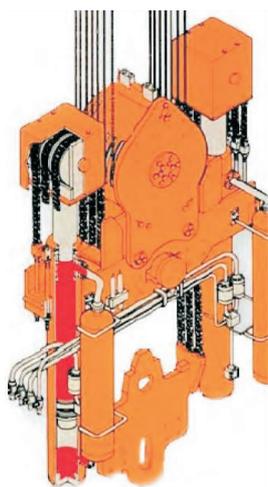


图 2 游车补偿

Fig.2 Traveling block compensation



图 3 死绳补偿

Fig.3 Dead rope compensation



图 4 主缸补偿

Fig.4 Master cylinder compensation



图 5 绞车补偿

Fig.5 Winch compensation

2 被动补偿系统

被动补偿系统是一套用来使浮式钻井平台可以保持基本恒定钻压的设备。它可以看做是一个用来

表 1 不同升沉补偿系统简介^[1]

Table 1 Introduction to different heave compensation systems^[1]

升沉补偿类型	安装位置	优点	缺点	应用情况
天车式	井架顶部	不占用平台甲板面积,管线短,不使用高压胶管	需要高强度井架与之配合;使平台重心升高,不利于稳定;增加了结构高处的风载,导致井架的风倾力矩增大	目前工作的大部分半潜钻井平台与钻井船均有使用。如海洋石油 981 平台
游车式	大钩与顶驱中间	无需特制井架,在既有平台上即可改造	补偿器要随着顶驱上下运动,安全隐患大;补偿器所配气液管路长,摩擦损失大	年代较老的钻井平台和科学钻探船上使用。如乔迪斯决心号勘探船
死绳式	死绳端	设备体积小,可用主被动一体式	钢丝绳磨损严重	中集蓝鲸 1 号和 2 号两座平台使用
主缸式	提升油缸	无需单独设计补偿器,使用提升油缸即可完成	成本高,油缸工艺要求严格	MHwirth 公司生产的 Ramrig 系统使用
绞车式	绞车	无需单独设计补偿器,使用专用钻井绞车即可	对钢丝绳磨损严重	应用较少,大部分工程船使用其安放水下设备

减少平台升沉运动对施加在钻头上钻压影响的低刚性“弹簧系统”。该系统使用很多罐压缩空气来充当“弹簧”,而驱动弹簧的“负载”就是大钩载荷。压缩

或释放与被动补偿油缸相连的蓄能器中的压缩气体,使油缸保持恒定的拉力,维持基本恒定的钻头位置和钻压。

被动补偿系统主要由气液蓄能器、补偿油缸、高压气罐组成,原理如图6所示。

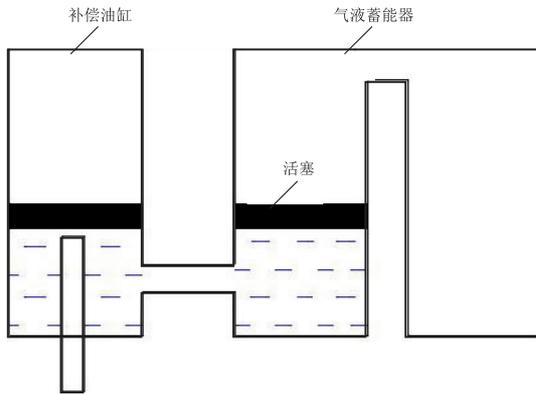


图6 被动补偿系统原理图

Fig.6 Schematic diagram of passive heave compensation system

被动升沉补偿系统在钻头接触孔底后开始起作用,所产生的力和运动用来平衡钻井平台升沉行程。如果钻具悬吊着没接触孔底,那么被动补偿系统将不产生作用;还需要指出的是,负载变动与行程变化是不存在正比例关系的。被动升沉补偿系统通常都会有启动载荷,这一载荷值为钩载的8%~12%,如果钩载变化量达到这一启动载荷值,那么被动补偿系统将会开始正常工作。在钩载较轻的情况下,被动补偿系统将不能精准响应浮式钻井平台升沉运动^[2-7]。

3 主动补偿系统

在升沉补偿系统中,“主动”一词的含义是:可以实时响应浮式钻井平台的升沉运动,在相当大的程度上保持钻头在孔底的稳定。

目前常用的主动升沉补偿系统都是基于同样的工作原理开发,通过升沉运动传感器(MRU)监测浮式钻井平台所处海域的洋流运动情况,并将数据传递至控制单元,控制单元通过读取传输过来的数据分析浪高、频率等海浪特性,之后向液压动力站发送指令,液压泵根据指令调节到合适的流量驱动油缸,使大钩在波浪下可以实时保持相对固定的位置。主动补偿系统对波浪特性的协同程度可达80%~93%,钩载补偿精度偏差仅为1%~2%^[8-15]。

主动补偿系统可以在整个钻井期间使钻头与孔底保持相对位置不变,其主要由以下5部分组成:

- (1) 补偿油缸和蓄能缸;
- (2) 升沉运动传感器;
- (3) 控制单元;

- (4) 操作系统;
- (5) 液压动力站。

主动升沉补偿系统原理如图7所示。

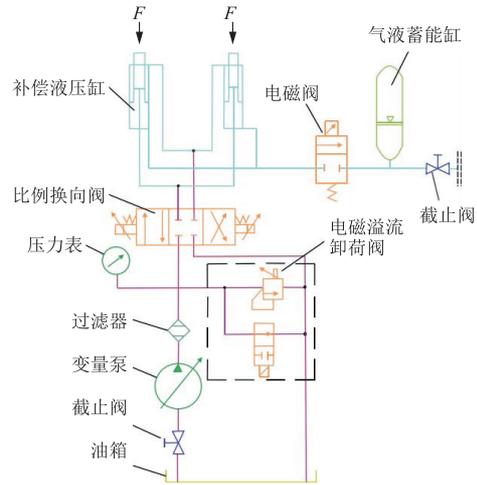


图7 主动升沉补偿系统原理^[15-16]

Fig.7 Schematic diagram of active heave compensation system^[15-16]

4 主被动一体式升沉补偿系统

一体式升沉补偿系统是结合主动式与被动式之间的复合系统,充分利用了两者的优势。国内学者的仿真研究结果表明,在同样的控制目标下,一体式补偿系统所需的能量比主动系统小,仅为主动式系统的10%;高压气瓶的体积为被动补偿系统体积的40%,甚至更小^[18-19]。

一体式升沉补偿系统主要由6部分组成:

- (1) 高压气罐、蓄能器和驱动油缸;
- (2) 升沉运动传感器;
- (3) 控制单元;
- (4) 操作系统;
- (5) 液压动力站;
- (6) 补偿平衡架。

一体式升沉补偿系统原理如图8所示。

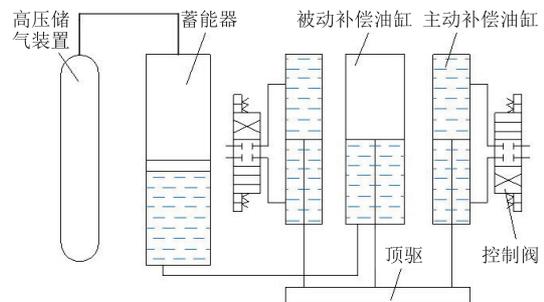


图8 一体式升沉补偿系统原理图

Fig.8 Schematic diagram of integral heave compensation system

一体式系统使用被动缸承载钻柱大部分质量,主动缸作为补充,使系统能够实时响应波浪带来的升沉变化,同时克服被动油缸的摩阻和气瓶内气体体积变化带来的不稳定^[20-21]。

5 升沉补偿系统使用实例

钻柱升沉补偿系统(主要是主动补偿系统)在海洋钻井领域应用广泛,不止于钻井过程中使用。其他的工作诸如:BOP 下放、取心作业、下套管和尾管悬挂工具、LMRP 断开与回接,均使用升沉补偿系统来提高工作效率^[8]。

5.1 石油钻井试验应用^[8]

为了量化评价已安装到平台上的主动补偿系统使用价值,北海海域的一艘四代半潜平台在最低工作气象条件下安排了 2 回次各 30 min 的钻井试验,分别试验打开与关闭主动补偿的效果,通过录井仪器记录钻井施工参数。试验海况:风速 30~35 节,浪高 3.9~5.4 m,平台升沉量 1.2~1.8 m。

试验所在地的地层为泥岩,钻具组合为 $\varnothing 311$ mm PDC 钻头+螺杆马达,试验井深 4200 m,试验井深立管压力 29 MPa,螺杆马达失速压力 30 MPa。根据设计,钻压需保持 54~73 kN。

在关闭主动补偿的 34 min 试验里,录井仪器记录数据见表 2。关闭补偿系统数据统计值如图 9 所示。

表 2 关闭主动补偿数据
Table 2 Data without active compensation

时间/ min	钻压/ kN	钻速/ ($m \cdot h^{-1}$)	时间/ min	钻压/ kN	钻速/ ($m \cdot h^{-1}$)
1.00	48.51	11.58	18.00	52.92	24.72
2.00	22.05	11.58	19.00	74.97	20.49
3.00	57.33	53.49	20.00	61.74	14.22
4.00	57.33	53.49	21.00	74.97	14.22
5.00	79.38	77.43	22.00	74.97	13.23
6.00	26.46	41.37	23.00	61.74	12.69
7.00	-48.51	30.48	24.00	74.97	20.01
8.00	26.46	26.91	25.00	66.15	25.95
9.00	79.38	37.11	26.00	39.69	25.83
10.00	70.56	27.18	27.00	48.51	20.40
11.00	26.46	27.18	28.00	48.51	19.41
12.00	48.51	26.31	29.00	66.15	22.89
13.00	44.10	30.90	30.00	44.10	31.26
14.00	83.79	29.34	31.00	52.92	25.56
15.00	35.28	34.50	32.00	66.15	37.02
16.00	48.51	28.08	33.00	52.92	18.45
17.00	57.33	29.52	34.00	66.15	18.45
平均值	52.66	27.38			

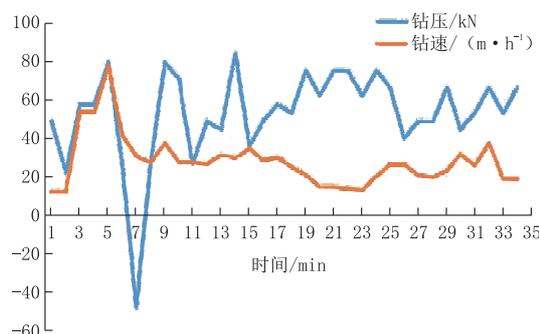


图 9 关闭补偿系统统计值
Fig.9 Data without active compensation

钻压平均为 52.66 kN,钻速为 27.38 m/h。

通过记录的数据可以看出,关闭补偿系统时,钻压是一直波动变化的,变化量取决于平台的升沉幅度。

在打开主动补偿的 34 min 试验里,录井仪器记录数据见表 3。

表 3 打开主动补偿数据
Table 3 Data with active compensation

时间/ min	钻压/ kN	钻速/ ($m \cdot h^{-1}$)	时间/ min	钻压/ kN	钻速/ ($m \cdot h^{-1}$)
1.00	52.92	36.00	18.00	70.56	42.30
2.00	52.92	36.00	19.00	70.56	44.40
3.00	74.97	42.00	20.00	70.56	42.00
4.00	79.38	28.20	21.00	39.69	42.00
5.00	57.33	27.00	22.00	-57.33	56.70
6.00	52.92	22.80	23.00	-119.07	56.70
7.00	52.92	42.30	24.00	-57.33	56.70
8.00	79.38	42.00	25.00	35.28	56.70
9.00	74.97	39.30	26.00	66.15	33.60
10.00	79.38	46.20	27.00	61.74	36.00
11.00	48.51	40.20	28.00	66.15	22.80
12.00	44.10	39.00	29.00	39.49	19.50
13.00	48.51	29.10	30.00	57.33	18.00
14.00	79.38	43.20	31.00	39.69	27.00
15.00	74.97	48.30	32.00	44.10	45.30
16.00	79.38	48.30	33.00	48.51	45.30
17.00	66.15	48.00	34.00	48.51	21.60
平均值	56.11	38.96			

使用补偿系统数据统计值如图 10 所示。

钻压平均值 56.11 kN,钻速为 38.96 m/h。

从以上记录的数据可以看出,打开主动补偿后,钻速提升了 11.6 m/h。

通过完整的对比 2 次试验参数,没有主动补偿参与的钻井过程中,如钻压一类的钻井参数虽然连续,但是需要司钻人为的不停地改变钻压。打开

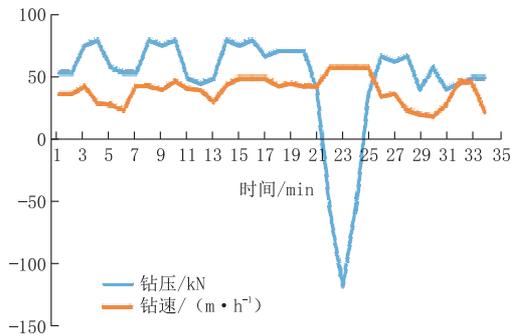


图10 使用补偿系统统计值

Fig.10 Statistics with compensation system

主动补偿的钻井工况下,平均钻压减小,钻速加快,钻头和马达都延长了使用寿命。虽然无法量化衡量节省的钻头和马达数量到底有多少,但是在最低工作条件下,主动补偿系统所提供的优势是不可比拟的。

5.2 海洋取心钻井应用实例^[8]

主动补偿系统在海洋取心作业中也扮演着重要的角色,由于极高的岩心质量依赖于作用于孔底恒定的钻压,因此主动补偿系统功不可没。

勘探区位于北海的石油公司,冬季作业时钻井平台升沉幅度在1.5 m,甚至更高,进行了6口井1300 m的取心作业,岩心采取率达96.3%。

在 $\varnothing 216$ mm井眼单组岩心最大长度80.5 m,在 $\varnothing 311$ mm井眼单组岩心最大长度50.2 m,平均岩心长度41 m。

6 结论

升沉补偿系统作为海洋钻井的核心装备,不仅能够提高钻进效率,还能够有效减少由于天气带来的停工,为成本高昂的海洋钻井有效降低非必要的支出。我国正大力推进海洋强国战略,未来搭载深沉补偿系统的钻井平台和钻井船将会成为主流,对于工程技术人员来说,掌握升沉补偿系统原理,在使用该装备或研发有自主知识产权的升沉补偿系统中都将大有裨益。

参考文献(References):

- [1] 康健伟.海洋平台钻杆的升沉补偿装置原理与装备研究[D].陕西西安:西安石油大学,2015.
KANG Jianwei. Principle and research of heave compensation system for drill string on platform[D]. Xi'an Shaanxi: Xi'an Shiyou University, 2015.
- [2] 贾俊梁,闫文辉,王维旭,等.主被动结合型钻柱升沉补偿装置

[J].石油矿场机械,2015,44(1):52-55.

- JIA Junliang, YAN Wenhui, WANG Weixu, et al. Active and passive combination drill string heave compensation device[J]. Oil Field Equipment, 2015,44(1):52-55.
- [3] 刘清友,徐涛.深海钻井升沉补偿装置国内现状及发展思路[J].西南石油大学学报(自然科学版),2014,36(3):1-8.
LIU Qingyou, XU Tao. Domestic status and thoughts on the development ideas of deepwater drilling heave compensation system[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014,36(3):1-8.
- [4] 王世圣,谢彬,曾恒一,等.3000米深水半潜式钻井平台运动性能研究[J].中国海上油气,2007,19(4):277-284.
WANG Shisheng, XIE Bin, ZENG Hengyi, et al. Study on motion performance of 3000 meters deep-water semi-submersible drilling platform[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007,19(4):277-284.
- [5] 方华灿.海洋钻井船升沉补偿装置的设计[J].石油钻采机械通讯,1976,(5):25-38.
FANG Huacan. Design of heave compensation device for offshore drilling ship[J]. Communication of Oil Drilling and Machinery, 1976,(5):25-38.
- [6] 张彦廷,刘振东,姜浩,等.浮式钻井平台升沉补偿系统主动力研究[J].石油矿场机械,2010,39(4):1-4.
ZHANG Yanting, LIU Zhendong, JIANG Hao, et al. Study on active force of compensation system for floating drilling platform[J]. Oil Field Equipment, 2010,39(4):1-4.
- [7] 邓智勇,高剑,谢金辉,等.主被动一体式升沉补偿系统及其控制方法[J].船舶科学技术,2014,36(11):102-107.
DENG Zhiyong, GAO Jian, XIE Jinhui, et al. Active-passive heave compensation system and the research about feedback corrective control method[J]. Ship Science and Technology, 2014,36(11):102-107.
- [8] Philip Bennett, Sedco Forex. Active heave: The benefits to operations as seen in the North Sea[C]// Amsterdam: SPE/IADC drilling conference, 1997:207-217.
- [9] 赵传亮,张树立,王嘉波.深水钻井船钻井模块研究[J].装备制造技术,2017,(7):121-123.
ZHAO Chuanliang, ZHANG Shuli, WANG Jiabo. Deepwater drilling ship drilling module research[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017,(7):121-123.
- [10] 陈进娥,何顺利,刘广峰.我国海洋石油勘探开发装备现状及发展趋势[J].油气藏评价与开发,2012,2(6):67-71.
CHEN Jine, HE Shunli, LIU Guangfeng. Current situation and development trends of China offshore oil exploration and development equipments[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2012,2(6):67-71.
- [11] 姜浩,刘衍聪,张彦廷,等.浮式钻井平台主动式钻柱升沉补偿装置设计[J].石油学报,2012,33(3):483-486.
JIANG Hao, LIU Yancong, ZHANG Yanting, et al. Design for an active drill-string heave compensation system of the floating drilling platform[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(3):483-486.
- [12] 姜浩,刘衍聪,张彦廷,等.浮式钻井平台被动升沉补偿装置设计[J].液压与气动,2011,(10):50-52.
JIANG Hao, LIU Yancong, ZHANG Yanting, et al. Re-

- search of passive heave compensation system for float drilling platform[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2011, (10): 50-52.
- [13] 陈祖波, 吕岩, 李志刚, 等. 浮式钻井钻柱升沉补偿概述[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(10): 28-32.
CHEN Zubo, LÜ Yan, LI Zhigang, et al. Review of drill string heave compensation systems for floating drilling platform[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(10): 28-32.
- [14] 吴金波, 宋宇宸. 海上作业起重机主动升沉补偿系统的设计与分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(15): 1989-1996.
WU Jinbo, SONG Yuchen. Design and analysis of active heave compensation system for offshore cranes[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(15): 1989-1996.
- [15] 蔡东伟, 刘荣华, 张作礼, 等. 一种主动升沉波浪补偿控制系统研究[J]. 船舶工程, 2012, 34(S2): 103-106.
CAI Dongwei, LIU Ronghua, ZHANG Zuoli, et al. Study of an active heave compensation control system[J]. Ship Engineering, 2012, 34(S2): 103-106.
- [16] 白鹿. 钻柱液压升沉补偿系统设计研究[D]. 山东青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
BAI Lu. Research and design of hydraulic heave compensation system for drill string[D]. Qingdao Shandong: China University of Petroleum, 2009.
- [17] 姜浩, 刘衍聪, 张彦廷, 等. 浮式钻井平台钻柱升沉补偿系统研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(6): 122-126.
JIANG Hao, LIU Yancong, ZHANG Yanting, et al. Research on drill string heave compensation system for floating drilling platform[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(6): 122-126.
- [18] 任克忍, 沈大春, 王定亚, 等. 海洋钻井升沉补偿系统技术分析[J]. 石油机械, 2009, 37(9): 125-128.
REN Keren, SHEN Dachun, WANG Dingya, et al. Technical analysis of offshore drilling heave compensation system[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(9): 125-128.
- [19] 张萌, 胡小东, 李波. 半主动式钻柱升沉补偿系统补偿机理分析[J]. 石油机械, 2012, 40(5): 57-60.
ZHANG Meng, HU Xiaodong, LI Bo. Analysis of the compensating mechanism of semi-active drill string heaving compensation system[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(5): 57-60.
- [20] 鄢华林, 姜飞龙. 海洋平台吊机波浪补偿系统研究[J]. 液压与气动, 2011, (2): 22-25.
YAN Hualin, JIANG Feilong. Research on wave compensation system of ocean-platform crane[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2011, (2): 22-25.
- [21] 张新福, 黄海波, 冯林. 一种主动式波浪补偿装置的设计与实现[J]. 液压与气动, 2011, (8): 27-29.
ZHANG Xinfu, HUANG Haibo, FENG Lin. The design and realization of an active heave compensation device[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2011, (8): 27-29.

(编辑 韩丽丽)