

深海海况下钻井船钻柱升沉补偿效率分析

熊云峰, 陈章兰

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了合理设计钻柱升沉补偿装置结构, 分析了其补偿效率。根据升沉补偿装置物理模型和牛顿第二定律, 建立了升沉补偿装置顶驱、大钩和钻柱的三自由度运动数学模型。采用 Runge-Kutta 算法求解运动模型, 获得了设计海况下钻头升沉运动规律。并与 1/10 升沉补偿装置模型实验结果比对, 数值模拟与实验波形吻合。分析了深海海况下, 井深、海底刚度以及波浪频率对升沉补偿装置有效补偿窗口的影响。结果表明, 深海海况对钻井船升沉补偿效率影响较大。其中: 随波浪频率增加, 钻柱升沉补偿装置补偿效率由高变低, 相当于低频滤波器; 不规则波情况下, 补偿效率有所降低; 井深增加, 补偿效率降低; 而随海底面刚度增加时, 位移补偿效率提高。

[关键词] 钻井船; 升沉补偿装置; 有效补偿窗口; 调节性能

[中图分类号] U 661.32⁺⁴

Analysis on Compensation Efficiency of Passive Heave Compensation System of Drill Vessel in Deep Sea States

XIONG Yunfeng, CHEN Zhanglan

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To design a passive heave compensation system for drill vessel, the heave compensation efficiency of drill passive heave compensation system was analyzed. In terms of physical model of heave compensation system and the Newton's second law, a mathematical model of the heave compensation system with three-degree-freedom including crown, hook and drill string was built up. The Runge-Kutta algorithm was employed to solve the built mathematical model. The motion of heave compensation system was then achieved and was validated by 1:10 reduced-scale real model. According to the validated mathematical model of the heave compensation system, the characteristics of the efficient compensative windows under various sea states were detailed. The adjustment of the heave compensative system to different sea stiffness was also discussed. Results show that the efficiency of compensation is dependent on sea states, and that decreases in wave frequencies and sea depth, and increases in case of harder seabed.

Keywords: drill vessel; heave compensation system; effective compensation window; adjustment performance

0 引言

深海石油钻探是我国实施能源战略的重要措施, 钻井船由于水线面小, 在深海钻井中得到广泛应

[收稿日期] 2019-05-16

[基金项目] 福建省自然科学基金项目(2017J01487)

[作者简介] 熊云峰(1969—), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 从事船舶水动力性能研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

用^[1]。钻井船在波浪作用下产生周期性的升沉运动,使钻柱上下往复运动,引起钻压波动和钻头脱离井底,影响钻头寿命和钻进效率,高海况下,甚至被迫停工,造成巨大经济损失。为隔离船体升沉对钻头工作的影响,降低钻井成本和提高钻进效率,需要对钻柱升沉运动进行补偿。升沉补偿装置按动力供应方式分为被动式、主动式和半主动式。由于船体大惯量^[2,3],主动式补偿装置能量消耗大,被动补偿装置采用增加伸缩钻杆和增设升沉补偿装置两类^[3],其中增设的气液装置为吸能元器件,一端与船体相连,另一端连接滑轮,滑轮通过钢丝绳和大钩与钻柱连接。船舶运动通过气液补偿装置后运动幅度大幅衰减,且不需要连续能量输入,即使在恶劣海况下,对力的补偿最高可达到 85%,加上优异的经济性能和稳定性,仍是补偿装置的主流方式^[4]。然而其补偿效率受海况影响大,相对前两者,半主动式节能和补偿综合效果好,特别是在大井深情况下优越性显著^[4]。我国深海采油工业起步晚,在大型海洋石油装备关键技术方面相对滞后^[5],加大海洋装备研发对我国能源发展战略具有重要意义。

钻柱被动升沉补偿装置由船体、顶驱(滑轮部分)、大钩和钻柱等组成,是多自由度系统,有多个固有频率和振型。深海海况下,波浪往往是多个波的叠加,具有不规则波特点,且波浪频率往往有一定的带宽,而且钻井深度和海底刚度仍具有不确定性,这些海况不确定性因素,经过船体线性传递至升沉补偿装置输入端^[2,3],再经多自由度系统传递运动,使得多自由度系统输出端的钻柱或钻头运动非常复杂,加上被动补偿装置有限的调节性,因而,被动升沉补偿装置在复杂海况输入下的补偿效率问题备受关注。

由于钻头位置特殊,通过测量钻头运动计算补偿性能非常困难,因此,采用数值或理论方法预测钻柱运动,对升沉补偿装置的补偿效率进行评价。根据升沉补偿装置的物理模型和牛顿第二定律,建立补偿装置动力学方程,并进行补偿性能分析^[3]。文献[4]采用 Simulink/AMESim 联合仿真模型,进行了绞车升沉补偿器的运动仿真。文献[2,6]采用解析方法建立了海况为规则波情况下钻柱升沉装置的解析方程,获得了规则波情况下钻柱运动。文献[7]采用 Matlab 数值分析了井深、海底刚度和规则波情况下波幅对钻压波动的影响。文献[8]采用 AMESim 数值方法,以大钩位移为补偿效率指标,分析了波高、蓄能器体积、大钩载荷和井深对大钩位移的影响。可以看出,升沉补偿装置的参数往往根据某个海况进行补偿设计,对各海况适应性研究相对较少,特别是深海海况下。

本文在广东某船企和高校合作的深海钻井装置的波浪补偿装置项目^①基础上,针对设计海况和升沉补偿装置的物理模型,建立了被动补偿装置的数学模型,采用数值计算方法,分析了不同海况和钻井深度情况下钻柱升沉补偿装置的补偿效率。

1 钻柱升沉补偿装置模型与设计工况下补偿效率

钻井船作业海域深为 3 000 m,设计要求钻柱升沉补偿装置最高作业海况为 6 级,对应波浪幅度为 7.62 m,波浪周期为 12 s,大钩负载为 453.5 t,钻压为 20 t。

钻柱升沉补偿装置简化的物理模型如图 1 所示^[2,7]。其中,气液补偿器的液缸端支撑在船体上,活塞杆端安装顶驱(动滑轮),利用滑轮的倍距效果,使绕过滑轮的大钩振幅只有船体升沉的一半,大钩通过钢丝绳与钻柱相连,钻头通过大质量的钻铤安装在钻柱末端。

根据图 1,由牛顿第二定律,可以建立顶驱、大钩和钻柱的三自由度升沉补偿装置运动数学模型:

$$\begin{cases} \ddot{x}_t = \{P_0 A [1 - (A_1/V_0)(x_H - x_t)]^{-k} + \text{sign}(\dot{x}_H - \dot{x}_t) F_p(\dot{x}_H - \dot{x}_t) - m_t g\} / m_t; \\ \ddot{x}_h = [k_r(x_t - x_h) - k_d(x_h - x_d) - m_h g] / m_h; \\ \ddot{x}_d = \{k_d(\dot{x}_h - \dot{x}_d) - (k_f/2)[(x_d - x_{\text{ref}}) - |x_d - x_{\text{ref}}|] + \text{sign}(\dot{x}_d) F_s(\dot{x}_d)^2 - B m_{\text{dd}} g\} / (m_{\text{dd}} + m_{\text{db}})。 \end{cases} \quad (1)$$

① 国家发改委海工专项(船工科[2013]116)

式中: x_t , x_h 以及 x_d 分别为顶驱、大钩和钻柱升降位移; x_H 为船体升降位移, 可近似为正弦运动 $\mu \sin \omega t$, 其中 μ 为波浪经船体运动衰减后的升降幅度, 由波高、钻井船结构以及尺度等因素决定, 比海浪幅值小, 钻井船升降运动周期与海浪周期相同^[2,3]; x_{ref} 为钻头平衡位置; m_{dd} 和 m_{db} 分别为钻柱和钻铤质量, 钻柱和钻铤浸入海水部分考虑浮力, 取总质量的 $1/3$ ^[6]; m_h 为大钩质量, 取 26 t; m_t 为顶驱质量, 取 15 t; F_p 为液缸内液体的粘性阻力系数, 取 $1\,639\text{ N}\cdot\text{s/m}$; F_s 为钻头与海底摩擦阻尼, 取 $1.1\text{ N}\cdot\text{s/m}$; c 为钻柱在泥浆中的粘性阻力系数, 取决于井眼情况及泥浆粘度等因素, 一般根据实验决定, 范围为 $1.00\sim 1.15$; k 为常数, 取 1; k_r 、 k_d 和 k_f 分别为钢丝绳、钻柱和海底的刚度; 蓄能器气体压力 P_0 设计为 20 MPa; 初始体积 V_0 为 15 m^3 ; A_1 为蓄能器活塞面积, 由扣除钻压后大钩负荷与液缸活塞杆保持力的静力平衡求得。

钻柱由钻杆、钻铤以及钻头组成, 钻杆外径为 139.7 mm, 内径为 100 mm, 钻铤长度为 60 m。钻柱刚度根据钻杆结构由胡克定律估算。当钻压波动为 ΔN 时, 钻杆长度 L 的变化量:

$$\Delta L = \Delta N L / (EA)。$$

(2)

式中: E 为钻柱材料的弹性模量, 一般取 210 GPa; A 为钻柱的横截面积。

由式 (2) 和胡克定律, 钻柱刚度 k_d 为:

$$k_d = \Delta N / \Delta L = EA / L。$$

(3)

同理, 由式 (2), 式 (3) 可求得钢丝绳刚度 k_r 。

数学模型式 (1) 的实验验证。华南某高校与船厂合作研究了被动式波浪补偿装置, 搭建了缩尺比为 1:10 的升降补偿装置。当实验平台输入 6 级海况的正弦波时, 波浪振幅为 7.62 m, 经船体衰减后船体升降振幅 μ 为 3.6 m。模型实验采用波浪周期为 4.1 s、波幅为 180 mm 的规则波为输入, 测得大钩升降加速度数据序列。加速度经过频率滤波去除噪声, 求解截止频率后, 再通过时域积分, 获得位移数据序列。采用 Runge-Kutta 算法求解补偿装置运动方程式 (1), 并经缩尺比转换, 提取数值结果, 其中大钩的位移与实验测量数据比较如图 2 所示。

虽然测量的加速度数据经积分后的升降数据中含有较多白噪声, 但其波形仍相当清晰。相同工况下, 式 (1) 数值模型中大钩升降运动与测量数据较为吻合, 验证了式 (1) 升降补偿装置运动模型。

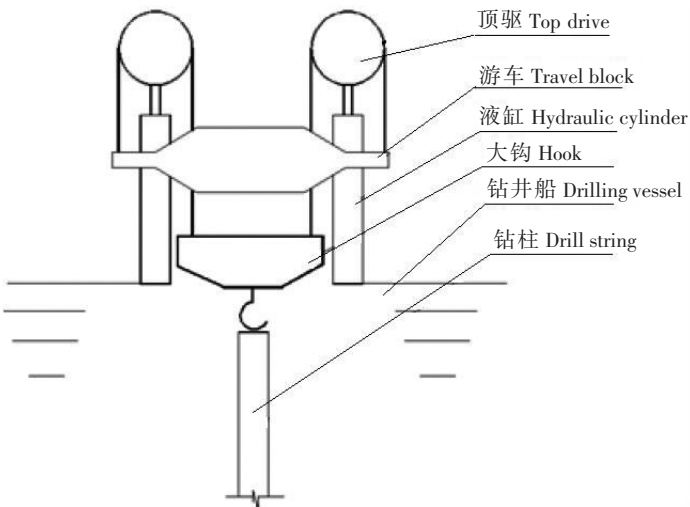


图 1 钻柱被动升降补偿装置物理模型

Fig.1 Physical model of a drill string passive heave compensation system

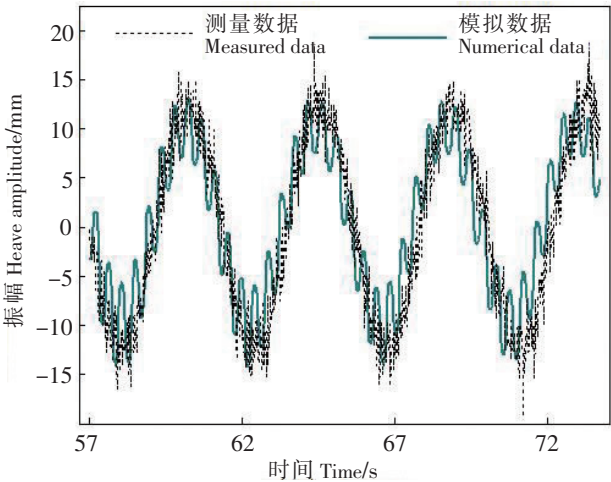


图 2 仿真数据与测量数据比较

Fig.2 Comparison between experimental and numerical hook displacements

2 深海海况下补偿装置特性分析

被动补偿装置根据海况完成结构设计后, 式 (1) 各参数基本确定, 由此可分析深海海况中钻深、海底刚度和波浪频率发生变化时, 钻柱升沉补偿装置的补偿特性。

2.1 海况对升沉补偿装置补偿效率的影响

考虑深海海况的波浪频率在一定频带范围内变化, 即改变式 (1) 中船体升沉 x_H 的频率, 计算钻柱末端钻头运动 x_d 。参考美国石油协会 API (American Petroleum Institute) 评价方法^[9], 钻头振幅以振幅比值 $20 \times \lg(X_d/X_H)$ (dB) 表示, 补偿效率以钻头振幅与 10% 船体升沉线参考线比较来评价。当钻深为 3 000 m、频率范围为 $[0.3 \ 1.3]$ Hz 时, 补偿效率如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 升沉补偿装置受波浪频率的影响, 在低频段补偿效率高, 钻柱升沉幅值在 10% 波浪幅值以内, 为有效补偿; 而在高频段补偿效率低, 钻柱升沉幅度大, 在波浪频率 1 Hz 以上时, 钻柱振幅超过 10% 船体升沉, 补偿效率低。可见在 6 级海况下, 设计的升沉补偿装置在波浪频率 $[0.2 \ 1]$ Hz 为有效补偿窗口。这一特点与文献^[10]的结论相吻合。图 3 结果与文献^[7]结论相符, 其中, AMESin 分析升沉周期对补偿效率的结果表明, 当升沉周期偏小时, 大钩位移增大。

2.2 海底面刚度对有效补偿窗口的影响

海底面刚度变化范围很大, 如海底面为软砂石时, 其典型体积模数为 14 GPa, 对应刚度为 360 kN/m; 而石英砂石海底面的典型的体积模数为 140 GPa, 对应刚度为 3 600 kN/m。假设三种海底面工况, 刚度分别为 360 kN/m, 1 200 kN/m 和 3 600 kN/m, 对应软海底面、硬海底面及更硬海底面工况。当钻深为 3 000 m、波浪振幅 7.62 m 和频率带宽为 $[0.2 \ 1.1]$ Hz 时, 计算式 (1), 得到不同海底面工况下钻头运动 x_d , 并由此计算补偿效率, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 三种海底面刚度的补偿效率随频率变化趋势基本相同, 即低频段补偿效率高, 而高频带补偿效率低。当海底面刚度不同时, 硬海底面海况对应的钻头振幅较软海底面的小, 被 10% 船体升沉幅度所截频率带宽大, 10% 有效补偿窗口宽; 软海底面补偿效率低, 几乎未被 10% 船体升沉幅度截取。

2.3 井深对有效补偿窗口的影响

钻头钻进时, 钻进深度增加, 钻柱长度增加, 由式 (3) 可知钻柱刚度降低。取相同海底刚度和输入波参数, 比较井深在 1 000 m、2 000 m 和 3 000 m 时, 被动补偿装置效率, 如

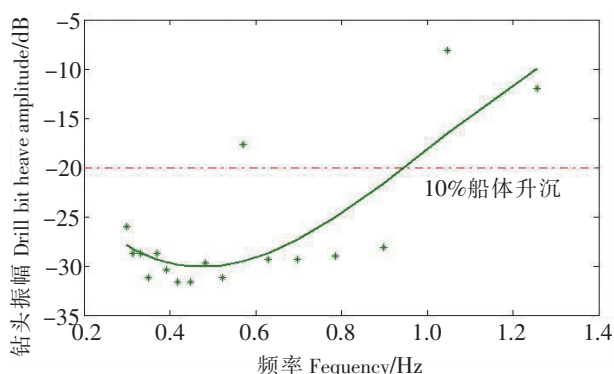


图 3 钻头振幅随波浪频率变化曲线

Fig.3 Drill bit heave amplitude against wave frequency

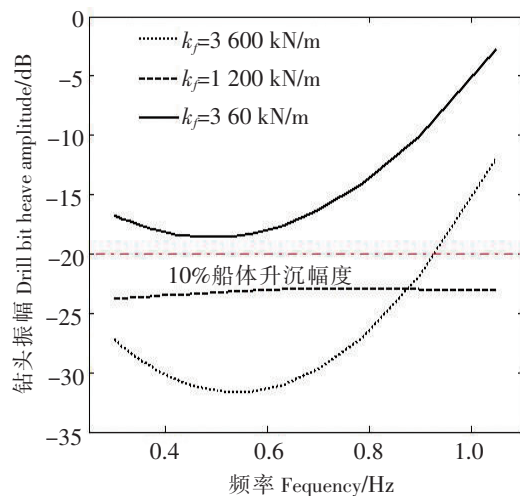


图 4 海底面刚度对有效补偿窗口的影响

Fig.4 Influence of seabed stiffness on effective drill string compensation window

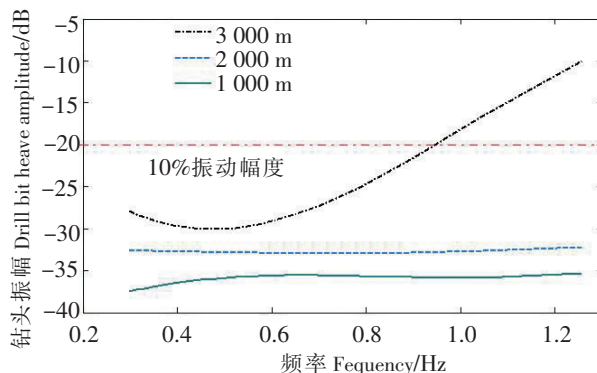


图 5 钻深对被动补偿装置效率的影响

Fig.5 Efficiency of compensation system-dependency on sea depth

图5所示。

由图5可以看出,较小钻深时,补偿效率高,在频带[0.3 1.3] Hz范围内,均在10%补偿效率内。随井深增加至3 000 m,钻柱刚度的降低,升沉补偿装置在低频带补偿效率尚在有效补偿窗口内,而在高频带的补偿效率降低明显,10%振动幅度内有效补偿窗口变窄。图5结论与文献[7] AMES-im模拟结果一致,其中,大钩升沉幅度随井深增加而增加。

2.4 非规则波对补偿效率的影响

深海海况往往是不规则波,为说明升沉补偿装置对不规则波的响应,以船体升沉周期为13 s与9 s的两种波谱叠加作为输入波,在海底刚度为3 600 kN/m、6级海况以及钻深为3 000 m时,船体升沉和钻头升沉的波形如图6a所示。可以看出,船体升沉和钻头升沉运动不再是规则谐波,而钻头运动不再是两种频率的简单叠加,而是不规则波形,原因在于钻柱升沉补偿装置振动特性的非线性。不规则波情况下,钻柱升沉补偿装置的补偿效率如图6b所示。可以看出,与周期分别为13 s(I)和9 s(II)的规则波输入时补偿效率相比,复合波/不规则波(III)的补偿效率较两者略有降低。

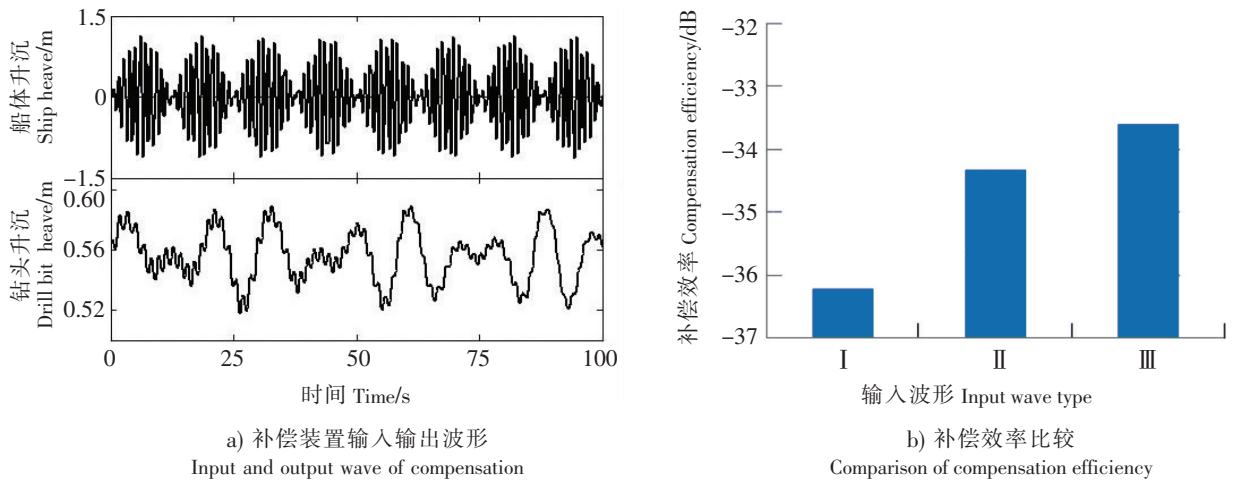


图6 不规则波对钻头升沉运动的影响
Fig.6 Influence of irregular waves on drill string motion

3 被动升沉补偿装置对补偿效率的调节作用

由图2~图5可以看出,当波浪频率、海底面刚度和钻深等海况变化时,补偿效率波动较大。尽管被动补偿装置设计完成后参数可调性有限,但根据被动补偿装置元器件设计要求,蓄能器气压最小时能保持大钩载荷,而满足此前提的蓄能器气压 P_0 和体积 V_0 取值存在一个可调范围,从而允许蓄能器刚度在一定范围内可调。

当蓄能器气压在[18 25] MPa,体积在[10 20] m^3 范围调节时,升沉补偿器刚度分析补偿效率变化如图7所示。当蓄能器气压小和体积大时,钻头升沉振幅为趋势线上大值;相反,则钻头升沉振幅为趋势线上小值,两者补偿效率存在差值。比较海底刚度分别为360 kN/m、1 200 kN/m和3 600 kN/m三种情况,小的海底

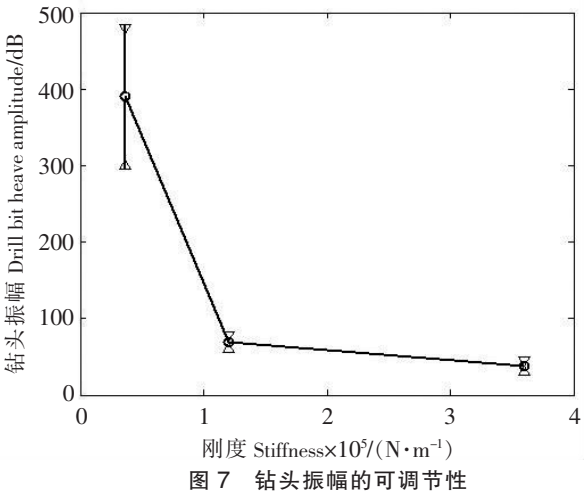


图7 钻头振幅的可调性
Fig.7 Drill bit motion dependency on accumulator stiffness parameters

刚度 (360 kN/m) 情况, 钻头振幅差值明显, 调节蓄能器气压和体积可显著调节振幅, 从而改善补偿效率; 而在大的海底刚度情况下, 钻头振幅差值不明显, 补偿效率的调节效果不理想。

4 结论

1) 根据钻柱升沉补偿装置物理模型和牛顿第二定律, 建立了三自由度被动升沉补偿装置数学模型, 与缩尺比 1:10 实验模型的大钩升沉运动比较, 验证了所建立的数学模型。

2) 被动补偿装置的补偿效率受波浪频率的影响, 有效补偿窗口呈现低通滤波特性, 即低频率船体升沉运动的补偿效率高。补偿效率受海深和海底刚度影响: 海底刚度越小, 补偿效率降低; 钻进深度增加, 相同海况输入时补偿装置的补偿效率降低。

3) 调节蓄能器压力和体积, 从而调节被动补偿装置刚度, 可以适当提高软海底面情况下补偿装置的补偿效率。

[参 考 文 献]

- [1] KORDE U A. Active heave compensation on dirl-ships in irregular waves [J]. Ocean Engineering, 1998, 25(7): 541-561.
- [2] 姜浩, 刘衍聪, 张彦延, 等. 浮式钻井平台钻柱升沉补偿系统研究. 中国石油大学学报, 2011, 35(6): 122-126.
- [3] 方华灿. 海洋石油钻采设备理论基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984: 283-309.
- [4] 黄鲁蒙. 海洋钻井绞车升沉补偿系统设计及控制策略研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2015.
- [5] 栾苏, 于兴军. 深水平台钻机技术现状与思考 [J]. 石油机械, 2008, 36(9): 135-139.
- [6] 方华灿. 海洋钻井船升沉补偿装置的设计 [J]. 石油矿场机械, 1976(5): 25-37.
- [7] HATLESKOG J T, DUNNIGAN W. An impedance approach to reduce the contact-instability whilst drilling with active heave compensation [J]. Ocean Engineering, 2012, 49: 25-32.
- [8] 白鹿. 钻柱液压升沉补偿系统设计研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
- [9] WOODACRE J K, BAUER R J, LRANI R A. A review of vertical motion heave compensation systems [J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 140-154.
- [10] MOROOKA C K. Design and implementation of an oil-drilling semisubmersible-riser-template system [D]. Tokyo: Transcript of Presentation at Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 1996.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)