文章编号:1673-5005(2021)02-0120-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2021.02.014

浮式钻井补偿绞车方案设计和性能仿真

黄鲁蒙1,张彦廷1,沈 蓉1,王丽君2,李悦江2,陈敬凯1

(1.中国石油大学(华东)海洋物探及勘探设备国家工程实验室,山东青岛 266580;
 2.兰州兰石石油装备工程股份有限公司青岛分公司,山东青岛 266520)

摘要:为提高海洋钻井作业的综合性能,开展电驱动绞车补偿系统的方案设计和控制策略研究。针对国外单绞车补 偿系统,提出一种基于双绞车的升沉补偿方案,钻机游动轮系的运动和受力完全对称,具有传动效率高、安全性好等 特殊优势。设计系统关键结构参数,并基于能量流分析对绞车升沉补偿工作能力及其影响因素进行理论计算和分 析,提出一种基于位移补偿方式的钻井运动联合控制方案,采用外环平台升沉位移和井底钻压闭环、内环矢量变频 电机转速闭环的串级结构,选择合适的外环控制算法,并利用基于 Simulation X 的系统模型开展控制性能仿真研究。 结果表明:双绞车补偿系统在不同钻井工况下的补偿能力较强,钻井作业窗口较宽;该系统运行稳定,可以实现升沉 补偿与自动送钻运动的联合控制,满足海洋钻井要求。

关键词:海洋钻井; 绞车升沉补偿; 送钻; 补偿能力; 串级控制

中图分类号:TE 924 文献标志码: A

引用格式:黄鲁蒙,张彦廷,沈蓉,等.浮式钻井补偿绞车方案设计和性能仿真[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(2):120-126.

HUANG Lumeng, ZHANG Yanting, SHEN Rong, et al. Scheme design and performance simulation of floating drilling compensation winch[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(2):120-126.

Scheme design and performance simulation of floating drilling compensation winch

HUANG Lumeng¹, ZHANG Yanting¹, SHEN Rong¹, WANG Lijun², LI Yuejiang², CHEN Jingkai¹

(1. National Engineering Laboratory of Offshore Geophysical and Exploration Equipment in China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. Lanzhou Lanshi Petroleum Equipment Engineering Company Limited, Qingdao Branch, Qingdao 266520, China)

Abstract: In order to improve the comprehensive performance of offshore floating drilling operation, the scheme design and control strategy of the electrical compensation winch were studied. In view of the single winch system, a double winch heave compensation scheme was proposed. The motion and force of the traveling gear train were completely symmetrical, and the gear train has special advantages of high transmission efficiency and good safety. The key structural parameters of the system were designed, and based on the analysis of energy flow, the compensation ability of winch heave and its influencing factors were calculated and analyzed theoretically. A joint control scheme of winch based on displacement control mode was proposed. The cascade control structure of outer ring heave displacement, drilling pressure closed-loop and inner ring vector variable-frequency motor speed closed-loop was adopted. The appropriate outer ring closed-loop control algorithm was selected. The simulation study of control performance was carried out by using the system model based on Simulation X. The results show that the double winch compensation system has a stable operation and can realize the joint control of compensation and

基金项目:海洋物探及勘探设备国家工程实验室资助项目(XK2017049);山东省自然科学基金项目(ZR2020QE298);中央高校基本科研业 务费专项(18CX02017A);第七代超深水钻井平台(船)创新专项

第一作者:黄鲁蒙(1986-),男,讲师,博士,硕士生导师,研究方向为海洋钻井装备和机电控制。E-mail:20170057@ upc. edu. cn。 通信作者:张彦廷(1968-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为海洋钻井装备、流体传动及控制工程。E-mail:ytzhang@ upc. edu. cn。

收稿日期:2020-04-10

bit feed motion. The simulation law meets the requirements of offshore floating drilling.

Keywords: offshore drilling; winch heave compensation; bit feed; compensation capability; cascade control

石油资源的开发和利用正在从浅海走向深海, 并向超深海发展^[1-2]。半潜式平台或浮船在海上进 行钻井作业时会产生周期性的升沉运动,严重影响 了钻井作业效率和安全性[3],因此浮式平台或船体 上必须配有钻柱升沉补偿装置。钻柱补偿装置通过 对海洋钻机上的游动系统和井下钻具进行控制,使 其运动不再受到平台和船体升沉运动的干扰^[4-5]。 国外海洋钻井升沉补偿技术的研究起步早,目前已 经开发出液压缸补偿和绞车补偿两种形式的产 品^[6]。传统的游车大钩和天车补偿装置均采用液 压缸补偿方式,通过调整活塞杆和缸体的相对位置 来达到运动补偿功能^[7-8]。随着设计及控制技术的 不断进步,2000年以后,美国 National Oilwell Varco 公司最早突破传统液压缸式钻柱升沉补偿系统的概 念,在常规钻机绞车的基础上增加了升沉补偿功能, 研发了新型电动绞车补偿系统[9-10].可取代专用的 游车大钩或天车液压缸补偿装置。2007年以后,中 国石油大学(华东)、宝鸡石油机械有限公司、山东 科瑞机械有限公司、西南石油大学等单位开展了不 同形式钻柱升沉补偿系统的研发[11-12],其中针对绞 车补偿系统,目前宝石机械已研发一套1000 hp 电 动补偿绞车工程样机,厂内试验取得了良好的补偿 效果^[13]。笔者基于单绞车补偿系统提出一种双绞 车补偿方案,对结构参数和升沉补偿能力进行计算, 提出升沉补偿与自动送钻的联合控制方案,并利用 Simulation X 软件对系统性能进行仿真研究。

1 双绞车升沉补偿方案设计

1.1 绞车升沉补偿工作原理

图1为海洋钻机绞车补偿系统原理示意图,绞 车安装在井架一侧,绞车滚筒与钻井钢丝绳的快绳 端相连;可编程控制器根据绞车转动信号、平台升沉 运动信号以及死绳拉力传感器检测到的井底钻压信 号,控制绞车滚筒往复转动,通过收放钢丝绳实现升 沉补偿、自动送钻、起下钻等海洋钻井作业^[14-15]。

1.2 双绞车升沉补偿系统方案

在钻井平台上,通常仅配有一套绞车,绞车滚筒 与钻井钢丝绳快绳端相连,而死绳端固定在井架上。 为了提高海洋钻井综合性能,提出了一种双绞车补 偿方案^[16],如图2所示,包括两台补偿绞车,每台绞 车分别与快绳端和死绳端相连,可以单侧驱动钻机负 载,也可以两台绞车同步运行,此时游动轮系运动和 受力完全对称,不再存在传统意义上的"死绳端"。



图 1 海洋钻机绞车补偿系统





图 2 双绞车提升及补偿系统



双绞车同步补偿方案的优点:

(1)提高了传动效率。相对于传统单绞车工作 方案,双绞车方案可以通过两台绞车同步收放钢丝 绳的快绳和死绳两端,天车滑轮组中间的定滑轮片 相对静止、无转动,因此每台绞车仅需要克服一半滑 轮片的摩阻,从而将游动轮系的传动损失减少一半。

(2)实现了冗余功能,提高了钻井安全性。两 台绞车可以互为备用,当一台绞车出现故障时,另一 台绞车仍可以正常运行,完成钻井相关作业,从而减 少了单台绞车失效带来的非作业时间,使补偿绞车 具备了冗余性。

(3)提高了钢丝绳和滑轮片的使用寿命。当提 升或下放负载的速度相同时,双绞车工作模式下钢 丝绳运动速度仅为单绞车的一半,因此减轻了钢丝 绳和滑轮片的磨损。

1.3 基于双滚筒补偿绞车传动方案和参数设计

为了实现双绞车补偿方案,提出了一种基于双 滚筒驱动的补偿绞车传动方案:在补偿绞车上设置 两台滚筒,利用钻机天车上的导向滑轮将钻井钢丝 绳的快绳端和死绳端分别连接到两台滚筒上,每台 滚筒利用多台大功率交流电机经过两级齿轮减速后 进行单侧驱动(图3),两滚筒之间通过离合器连接, 可以同步运行,也可以独立运行。



图 3 单滚筒补偿绞车结构

Fig. 3 Structure of compensation winch with single drum

以额定载荷 454 t、额定补偿行程 5 m、周期 12 s 作为性能指标^[17],设计了补偿绞车、钻机游动轮系、 井下钻具的关键结构参数,具体参数如下:额定补偿 速度为 1.3 m · s⁻¹,最大钻柱质量为 454 t,游动系 统质量为 80 t,钻头设定钻压为 20 t,主滚筒尺寸 Φ1 580 mm×1 650 mm,单侧绞车向高速转动轴的总体 折算转动惯量为 300 kg · m²,绞车减速器减速比为 16.2,电机型号为 5GEB 27,电机额定功率为 8 台× 1 100 kW,电机额定转矩为 11 000 N · m,游动轮系 的有效绳数为 16、12、8、4,单位长度钢丝绳刚度为 1.6×10⁶ N · m⁻¹,滑轮片传动效率为 97%。

2 系统升沉补偿能力的理论计算

2.1 绞车补偿系统能量流分析和计算

分析了绞车的能量传递和消耗过程,在上提负 载过程中主要由发电系统为绞车提供能量;在下放 负载过程中主要由钻机负载的重力势能提供能量, 基本不需要消耗电能,多余能量通过变频单元和制 动电阻转化为热能;因此仅需考虑提升负载工况。

在提升负载过程中,假设系统处于理想补偿状

态,钻柱无动载荷,则电机主要用来驱动钻机静载 荷、驱动绞车和游动轮系往复转动、克服传动摩阻。

(1)假设平台升沉运动为标准正弦波形。

$$x_0 = H \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right),\tag{1}$$

$$y_0 = \frac{2\pi H}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right).$$
 (2)

式中, x_0 为平台升沉位移,m;H为平台升沉幅值,m; T为平台升沉周期,s; v_0 为平台升沉速度, m/s_0

(2)克服钻机静载荷与传动摩阻的电机功率。

$$P_{\text{gravity}} = \frac{Gv_0}{\eta} \,. \tag{3}$$

式中,G为钻机静载荷,N;η为绞车与游动轮系的总 效率。

(3) 驱动绞车、滑轮片转动的电机功率。

$$P_{\text{inertia}} = I \frac{\mathrm{d}^2 \theta \mathrm{d} \theta}{\mathrm{d}t^2 \, \mathrm{d}t} , \qquad (4)$$

$$\theta = -\frac{Z}{D} x_0 i. \tag{5}$$

式中,*I*为折算转动惯量(按照能量守恒原则,将绞 车传动系统与钻机游动轮系滑轮片的转动惯量全部 折算到电机轴上),kg·m²;θ为电机轴的角位移, rad;*Z*为游动轮系有效绳数;*i*为减速器传动比。

2.2 绞车补偿能力数据计算

基于功率计算公式和设计参数,计算得到补偿 运动过程中绞车电机克服所有负载所消耗的功率; 然后在电机整个调速范围内,通过与电机额定功率 进行对比确定绞车额定补偿能力。首先计算了补偿 周期为12s时,不同钻井有效绳数下、双绞车的补 偿能力曲线,如图4所示。然后计算得到了钻井有 效绳数为12时,不同升沉补偿周期下、双绞车的补 偿能力曲线,如图5所示。图4、5中,X轴为补偿载 荷,Y轴为绞车所能补偿的最大升沉幅值。



绞车补偿系统的补偿载荷和补偿幅度变化范围 很大,不再受到液压缸行程的限制;绞车在不同钻井 工况下的补偿能力较强,钻井作业窗口较宽,满足本 系统设计指标。





(number of effective ropes of 12)

分析绞车补偿能力的变化规律,可以看出:

(1)补偿能力受到钻井有效绳数的影响。绞车 补偿系统可以通过改变有效绳数改变绞车和钻柱负 载之间的传动关系;根据补偿能力数据,针对不同钻 井工况制定相应的游动轮系变化规则,可提高绞车 在不同工况下的补偿能力和作业效率,并使电机始 终在高效区运行。为此提出了一套基于可变绳系的 游动轮系设计方案,可以灵活改变游动轮系 结构^[18]。

(2)补偿能力受到钢丝绳松弛现象影响。在轻载工况下,绞车补偿能力较强,比如有效绳数为4时的最大补偿行程甚至达到二三十米,超过了平台升 沉运动的范围;但实际上,当补偿运动幅度过大时, 钻井钢丝绳收放线速度和线加速度较大,理论上会 造成钢丝绳内部张力反弹,产生"鸟笼"现象,导致 钢丝绳变形和损伤,因此轻载工况的升沉补偿幅度 实际也不能太大。

以有效绳数8绳、补偿周期12s时为例,图6为 不同负载时的补偿能力曲线,图中虚线段为根据动 力学仿真结果对轻载工况补偿能力的修正曲线,其 变化规律与NOV公司公开的产品资料类似^[19]。

(3)补偿能力受到电机过载能力的影响。以上 补偿能力曲线是基于电机的额定连续工作状态计算 而来;而实际电机在断续工作状态下还具有较大的 过载能力,美国 GE 电机过载系数达到 140%。补偿 绞车可以在特殊的恶劣海况下维持运行一段时间, 直到海况恢复平稳;否则如果海况持续恶劣,则只能 在绞车额定补偿能力范围内对当前海况进行部分补 偿,或者直接关闭补偿系统。





3 运动控制策略

3.1 补偿与送钻的联合控制方案

提出一种联合控制方案,如图 7 所示:采用外环 升沉位移和井底钻压闭环、内环变频电机转速闭环 的串级结构,外环采用位移控制,根据钻压信号计算 送钻进尺量,将送钻进尺信号 x_b 与升沉位移信号 x_h 叠加,然后以叠加信号作为绞车的给定信号 x_{set},以 滚筒实际补偿线位移 x_d 作为反馈信号(将滚筒角位 移信号转换为大钩线位移信号),以两者的偏差 x_e 输入控制器,经过位移控制器运算,输出信号f控制 电机的速度(频率),同时实现对两种运动的同步 跟踪。



图 7 钻井运动联合控制方案



3.2 外环控制器

(1)位移闭环。外环位移控制器选择常规 PID 作为控制算法,为了提高系统快速性,防止引入干 扰,以比例控制为主,取较小的积分和微分环节。

(2)钻压闭环。外环钻压控制器采用前馈+分 段 PI 反馈控制的方法,前馈是指根据钻压-钻速经 验关系,预先给定送钻速度作为前馈信号;然后再利 用钻压闭环,通过 PI 控制器得到反馈控制信号;两 部分信号叠加后积分成送钻进尺信号,进而利用绞 车位移闭环实现送钻。

4 系统仿真

4.1 基于 Simulation X 的动力学仿真模型

Simulation X 软件是国外海洋工程领域常用的 仿真平台之一^[20],如图 8 所示,利用 Simulation X 建 立了系统仿真模型,从而实现对系统动力学特性及 控制效果的仿真。

仿真时间设置:Start-0 s, Stop-200 s。

求解器选择: Fixed Step Solver (External Solver)。

仿真步长设置:dtMin 0.0008 s。



图 8 基于 Simulation X 的双绞车补偿系统模型 Fig. 8 Model of compensation system with dual-winch based on Simulation X

4.2 控制性能仿真利用

Simulation X 动力学模型开展仿真研究,选择额 定设计工况作为仿真工况。首先选择行程 5 m、周 期 12 s 的正弦波模拟平台升沉运动,作为仿真模型 的输入激励信号,通过试凑法整定合适的位移控制 器参数,控制绞车对该升沉运动进行补偿;然后以设 定钻压 20 t 作为仿真模型输入激励信号,整定合适 的钻压控制器参数,控制绞车同时实现自动送钻 运动。

图 9 为平台和游车大钩的升沉运动曲线,为了 模拟不同钻井过程,将仿真设置为 4 个阶段。

(1)升沉补偿的稳定运行阶段(0~30 s)。位移 控制器比例增益设置为50,可以看出补偿功能稳定 运行后,游车大钩的运动幅度较小,相对于平台升沉 的位移补偿率超过93%,精度较高。

(2)钻头接触井底前阶段(30~50 s)。升沉补 偿运动运行稳定后,开始准备钻进,送钻开始前钻头 与井底之间存在一段距离,模型中设置钻头与井底 距离1m,然后以180m/h速度手动或自动下放钻 柱,当钻头开始接触井底时停止。 (3)自动送钻阶段(50~200 s)。设定钻压为20 t、钻压控制器比例增益为50,启动自动送钻,由于比 例增益较大,送钻速度较快,钻柱快速下放使钻头很 快加载到设定钻压;送钻运动稳定后,井底钻压在设 定钻压附近波动,此时将钻压控制器比例增益下降 到30,在不影响送钻性能的前提下,提高了系统稳 定性。由图9中可以看出,钻柱大约以35 m/h 的速 度持续送进,实现了升沉补偿与自动送钻运动的同 步稳定运行。



Fig. 9 Variation rules of heave displacement 图 10 为自动送钻过程中的钻压阶跃响应曲线。 图中绿色曲线为设定钻压 20 t 的阶跃信号,可以看 出阶跃响应动态性能良好,钻压稳定在 24 kN 内,波 动率为 12%。



5 结 论

(1)提出的新型双绞车补偿方案中,设计了双 滚筒绞车的关键结构,两台滚筒可同步运行,此时游 动轮系运动和受力完全对称,相对于单绞车方案,具 有传动效率高、安全冗余、钢丝绳和滑轮片使用寿命 长等特殊优势。

(2) 对绞车补偿能力进行了定量评价, 绞车补 偿系统在不同钻井工况下的补偿能力较强, 钻井作 业窗口较宽, 满足技术指标要求。

(3) 双绞车补偿系统运行稳定,可实现补偿与 送钻运动的联合控制,补偿率可达 93%,送钻过程 运行平稳,满足海洋浮式钻井要求。

参考文献:

- 周守为,李清平,朱海山,等. 海洋能源勘探开发技术 现状与展望[J]. 中国工程科学,2016,18(2):19-31.
 ZHOU Shouwei, LI Qingping, ZHU Haishan, et al. The current state and future of offshore energy exploration and development technology[J]. Engineering Sciences, 2016, 18(2):19-31.
- [2] 吴国干,方辉,韩征,等."十二五"中国油气储量增长
 特点及"十三五"储量增长展望[J].石油学报,2016, 37(9):1145-1151.

WU Guogan, FANG Hui, HAN Zheng, et al. Growth features of measured oil initially in place & gas initially in place during the 12th Five-Year Plan and its outlook for the 13th Five-Year Plan in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016,37(9):1145-1151.

[3] JU Shaodong, CHANG Yuanjiang, CHEN Guoming, et al. Envelopes for connected operation of the deepwater drilling riser [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1):105-110.

[4] 熊云峰,陈章兰.钻井钻柱升沉补偿系统国内研究现 状及发展重点[J]. 舰船科学技术,2018,40(12): 78-83.

> XIONG Yunfeng, CHEN Zhanglan. Domestic research status and development emphases of drill string heave compensation system[J]. Ship Science and Technology, 2018,40(12):78-83.

[5] 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.

- [6] WOODACRE J K, BAUER R J, IRANI R A. A review of vertical motion heave compensation systems [J]. Ocean Engineering, 2015, 104:140-154.
- [7] HAAØ J, VANGEN S, TYAPIN I, et al. The effect of friction in passive and active heave compensation of crown block mounted compensators: Proceedings of the 2012 IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas Production[C]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [8] ROBICHAUX L R, HATLESKOG J T. Semi-active heave compensation system for marine vessels: 5209302 A[P]. 1993-05-11.
- [9] National Oilwell Varco Limited Company. Drilling drawworks and hoisting systems [EB/OL]. [2020-04-23]. https://www.nov. com/products/drilling-d-rawworks-andhoisting-systems.
- [10] FIVELSTAD O, VERHOEF R, OGG J, et al. Dual active heave drilling drawworks: from concept to operational life[R]. SPE 168019, 2014.
- [11] 刘振东,张彦廷,黄鲁蒙,等.海洋钻井天车升沉补偿 系统不同摇摆装置性能分析[J].中国石油大学学报 (自然科学版),2018,42(6):145-152.
 LIU Zhendong, ZHANG Yanting, HUANG Lumeng, et al. Performance analysis of different swing devices in crown-block heave compensation system for offshore drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(6):145-152.
- [12] 徐涛,刘清友,代娟,等.新型半主动倍增程式升沉补 偿装置设计与仿真分析[J].中国机械工程,2016,27
 (5):663-668.

XU Tao, LIU Qingyou, DAI Juan, et al. Design and simulation analysis of new semi-active and multiplication

process heave compensation device [J]. China Mechanical Engineering, 2016,27(5);663-668.

- [13] 王福贵,张强,梁顺安. 1000 hp 主动钻井升沉补偿绞车的研制[J]. 机械工程师,2018(11):115-121.
 WANG Fugui, ZHANG Qiang, LIANG Shunan. Development of 1000 hp active heave compensation drawworks
 [J]. Mechanical Engineer, 2018(11):115-121.
- [14] KYLLINGSTAD A. Method and apparatus for active heave compensation: 20100057279 A1 [P]. 2010-03-04.
- [15] 张彦廷,黄鲁蒙,陈国明,等. 深水钻井补偿绞车的节能机理及解耦控制方案研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4):124-131.

ZHANG Yanting, HUANG Lumeng, CHEN Guoming, et al. Study on energy saving-mechanism and decoupling control scheme of compensation drawworks for deepwater drilling[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017,41(4):124-131.

- [16] 黄鲁蒙,张彦廷,孟德超,等.海洋钻井双绞车升沉补 偿及自动送钻系统:2014104716576[P].2014-09-16.
- [17] 孟德超,王丽君,魏双会,等.海洋钻井平台 15 000 m 主动补偿绞车技术分析[J].石油机械,2017,45 (11):37-41.
 MENG Dechao, WANG Lijun, WEI Shuanghui, et al. Technical analysis of active heave compensate drawworks of 15 000 m offshore drilling platform [J]. China Petroleum Machinery, 2017,45(11):37-41.
- [18] 宋超,魏双会,张建,等.可变绳系的双滚筒绞车提升 系统及绳系变换方法:201710154690X[P].2018-10-30.
- [19] KYLLINGSTAD A. Dual drawworks provide operational redundancy and reduce cut and slip costs [R]. SPE 79826, 2003.
- [20] 刘艳芳. SimulationX 精解与实例[M]. 北京:机械工 业出版社,2010:165.

(编辑 沈玉英)