

深水钻井补偿绞车的节能机理及解耦控制方案研究

张彦廷¹, 黄鲁蒙¹, 陈国明¹, 任克忍², 殷晓康¹, 张 伟³

(1. 中国石油大学海洋油气装备与安全技术研究中心, 山东青岛 266580; 2. 国家油气钻井装备工程技术研究中心, 陕西宝鸡 721002; 3. 石油工程地球物理华北分公司, 河南郑州 457000)

摘要:为解决深水钻井电动补偿绞车能耗过高、钢丝绳磨损严重及运动耦合的技术问题,针对不同钻井作业过程,分析电动补偿绞车的节能潜力,提出一套基于能量回收的新型液压驱动方案,可以对不同钻井作业过程中的负载重力势能及绞车回转系统的惯性动能进行回收与再利用;分析电动补偿绞车的运动耦合机理,进而提出多套软硬件解耦控制方案,可以实现升沉补偿运动与自动送钻运动的解耦控制。设计绞车补偿系统的关键结构参数,研制一套原理样机及其试验系统,并针对不同海况与工况进行仿真与试验研究。结果表明:新型液压驱动方案相对于电驱动方案具有明显的节能效果;绞车的大滚筒结构提高了钢丝绳的使用寿命;基于差动行星传动与基于双绞车驱动两种硬件解耦方案控制效果良好,满足海洋浮式钻井的性能要求。

关键词:深水钻井; 绞车; 升沉补偿; 送钻; 能量回收

中图分类号:TE 851 **文献标志码:**A

引用格式: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.

Study on energy-saving mechanism and decoupling control scheme of compensation drawworks for deepwater drilling

ZHANG Yanting¹, HUANG Lumeng¹, CHEN Guoming¹, REN Keren², YIN Xiaokang¹, ZHANG Wei³

(1. Centre for Offshore Engineering and Safety Technology in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. State Research Center for Petroleum Drilling Equipment Engineering Technology, Baoji 721002, China;
3. North China Branch of Sinopec Geophysical Company, Zhengzhou 457000, China)

Abstract: In order to solve the technical problems of electrodynamic compensation drawworks for deepwater drilling including high energy consumption, serious wear of wire rope and motion coupling, a new type of hydraulic power system based on energy recovery is putforward according to the analysis on energy-saving potential of electrodynamic compensation drawworks under different processes of offshore drilling operations. The hydraulic power system can recover and reuse the gravitational potential energy and inertial kinetic energy of system in the process of different drilling operations. The software and hardware-decoupling control schemes which can realize the decoupling control of heave compensation movement and automatic bit feed movement are putforward according to the analysis on motion coupling mechanism of electrodynamic compensation drawworks. Then, the key structural parameters of the drawworks compensation system are calculated, and the principle prototype of compensation drawworks and the test system are developed. Simulation and experimental studies on the compensation draw-

收稿日期:2016-11-12

基金项目:工业和信息化部海洋工程装备项目(联装[2014]504号);中国博士后科学基金项目(2016M592269);青岛市博士后项目(2015253);中国石油大学引进人才(博士)基金项目(YJ201601048)

作者简介:张彦廷(1968-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为流体传动及控制工程。E-mail:ytzhang@upc.edu.cn。

通讯作者:黄鲁蒙(1986-),男,讲师,博士,研究方向为海洋钻井装备。E-mail:huang@upc.edu.cn。

works are carried out under different sea conditions and working states. The results show that the new type of hydraulic power system has significant energy saving effect compared with the electrodynamic compensation drawworks. The service life of wire rope is increased by using the drawworks drum with large diameter. Moreover, the control effect of hardware decoupling schemes based on the differential planetary transmission and dual drawworks is good, which can meet the performance requirements of the offshore floating drilling.

Keywords: deepwater drilling; drawworks; heave compensation; bit feed; energy recovery

深水石油钻井所采用的浮式钻井装置在风浪等自然因素的作用下将产生周期性的升沉运动,从而带动钻井装备与钻柱在垂直方向上进行升沉运动,影响钻进效率,增加钻井成本,甚至造成安全事故^[1]。浮式钻井平台或钻井船上必须配备一套升沉补偿装置,用来稳定井底钻压、减轻钻机动载荷^[2-3]。升沉补偿系统是集机、电、气、液、自动控制、智能检测为一体的复杂装备。随着设计、驱动、控制、节能及检测技术的不断进步,升沉补偿技术也得到了快速发展,已经广泛应用于海洋钻井、海洋采矿、海洋起重、水下安装等各个方面,可以有效地提高海洋钻井和海洋采矿的工作效率,提高海洋结构吊装、海洋货物装卸的平稳性和安全性,因此成为海洋工程领域的关键技术之一。国内外学者在过去 40 年间对升沉补偿技术进行了卓有成效的研究^[4-9]。美国 National Oilwell Varco 公司最早突破了传统液压缸式钻柱升沉补偿系统的概念^[10],研发了电动补偿绞车^[11-12],其后 Cameron、AkerSolutions 等公司也相继将补偿绞车产业化。电动补偿绞车将升沉补偿功能集成到钻井绞车上,节省了一套专用的液压补偿系统,具有补偿行程不再受液压缸行程限制、平台载荷与占用空间少、钻井系统重心低、起下钻速度快、维护成本低等特殊优势^[13-14]。在深水钻井平台上,还可以同时配备两台补偿绞车,进一步提高了补偿能力,增大了海洋钻井作业窗口^[15]。电动补偿绞车具有诸多的性能优势,但也存在着电机功率及能耗过大、钻井运动相互耦合、钢丝绳磨损严重的缺点^[16-17]。为了突破能耗和控制效果两大技术瓶颈,笔者开展深水钻井补偿绞车的节能机理及解耦控制方案研究。

1 补偿绞车节能机理及耦合机理分析

1.1 电动补偿绞车工作原理

绞车补偿系统的原理如图 1 所示。PLC (programmable logic controller) 控制器根据旋转编码器检测的绞车转动信号、运动参考单元检测的平台升沉运动信号、井下钻压测量装置检测的井底钻压信号,实时控制绞车电机的转速及转向,从而驱动绞车完

成升沉补偿、自动送钻、起下钻等海洋钻井作业^[14]。

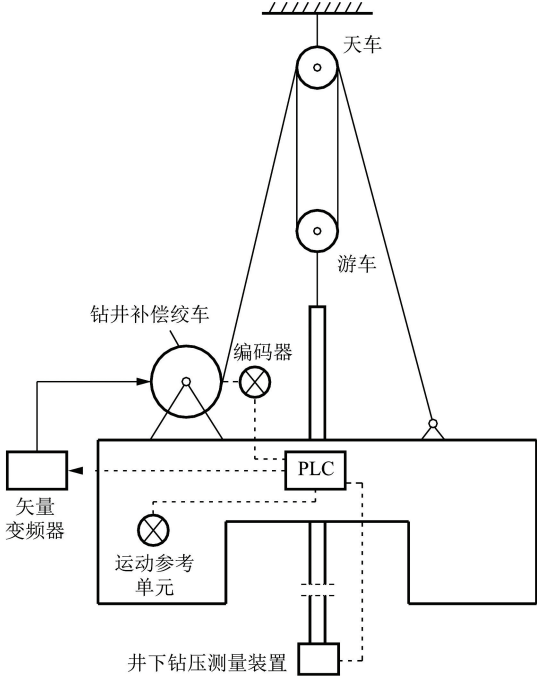


图 1 绞车补偿系统的原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of drawworks compensation system

电动补偿绞车的结构原理如图 2 所示。采用交流变频矢量控制技术,利用多台大功率交流变频电机通过齿轮减速器驱动绞车滚筒。

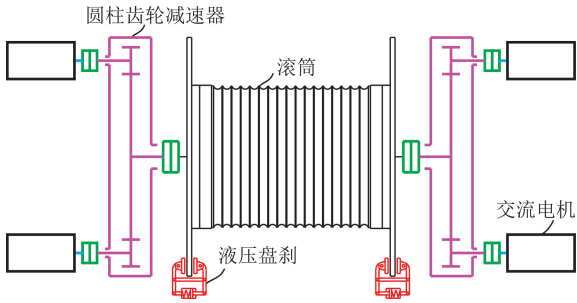


图 2 电动补偿绞车结构
Fig. 2 Structure diagram of electrodynamics compensation drawworks

电动补偿绞车利用电机克服海洋钻井作业过程中的所有载荷,工作载荷与运动行程越大,则电机的功率及能耗越高。升沉补偿运动的补偿载荷与补偿行程较大,往复运动过程中还要克服绞车回转系统

的惯性,因此电动绞车补偿系统的功率及能耗比常规钻井绞车大很多,经济性较差^[17]。

电动补偿绞车在升沉补偿运动过程中,钻井钢丝绳上会产生频繁的交变应力,影响了钢丝绳的使用寿命。可以通过增大绞车滚筒和滑轮片直径来减轻钢丝绳的磨损,但同时会进一步增大电机能耗。

综上所述,电机功率及能耗过大的问题严重影响了电动补偿绞车的综合性能,为解决该问题,首先对电动补偿绞车在不同海洋钻井作业过程中的节能潜力进行分析。

1.2 升沉补偿运动节能潜力

在升沉补偿运动过程中,电机用来承担钻柱的静载荷与动载荷,并克服绞车回转系统的惯性。

(1) 驱动钻机负载的电机功率。假设钻柱在空间中的绝对位置不变,则电机仅克服钻柱静载荷、传动过程中的阻尼与摩擦力。

平台下降、提升钻柱时的电机功率 $P_{\text{lift_mot}}$ 为

$$P_{\text{lift_mot}} = Gv_s / \eta_1. \quad (1)$$

平台上升、下放钻柱时的电机功率 $P_{\text{lowe_mot}}$ 为

$$P_{\text{lowe_mot}} = Gv_s \eta_1. \quad (2)$$

式中, G 为钻柱静载荷, N; v_s 为平台升沉运动速度, m/s; η_1 为传动系统效率。

节能潜力: 平台下降时, 电机提升钻柱, 将电能转化为钻柱负载的重力势能; 平台上升时, 电机下放钻柱, 电机处于制动状态, 将负载重力势能转化为无用的热能; 因此, 补偿绞车可以对钻柱下放过程的重力势能进行回收和存储, 并在提升钻柱时将其释放出来。

(2) 克服绞车回转系统惯性的电机功率。在升沉补偿运动过程中, 电机驱动绞车进行往复运动, 克服回转系统惯性的电机功率 $P_{\text{iner_mot}}$ 为

$$P_{\text{iner_mot}} = I \frac{d^2 \theta}{dt^2}. \quad (3)$$

式中, I 为传动系统向电机轴上的折算转动惯量, kg · m²; θ 为电机轴角位移, rad; t 为时间, s。

节能潜力: 电机驱动绞车加速时, 将电能转化为回转系统的惯性动能; 电机驱动绞车减速时, 电机处于制动状态, 将回转系统惯性动能转化为无用的热能; 因此, 补偿绞车可以对减速过程中的回转系统惯性动能进行回收和存储, 并在绞车加速时将其释放出来。

1.3 自动送钻运动节能潜力

在自动送钻运动过程中, 电机用来承担钻柱的静载荷与动载荷, 并始终处于制动状态。假设井底

钻压保持不变, 每钻进一个立根, 电机制动产生的热能 $E_{\text{bit_mot}}$ 为

$$E_{\text{bit_mot}} = GH\eta_1. \quad (4)$$

式中, H 为当前钻井深度, m。

节能潜力: 补偿绞车可以对钻柱下放过程中的负载重力势能进行回收和存储, 并在提升大钩、顶驱等钻机游动系统时将其释放出来。

1.4 起下钻过程节能潜力

在下钻过程中, 可以对钻柱负载的重力势能进行回收, 并在提升钻柱游动系统时将其释放出来。同理, 在起钻过程中, 可以对游动系统的重力势能进行回收, 并在提升钻柱时将其释放出来。起钻或下钻一次, 理论上可以节能 $E_{\text{trip_mot}}$ 为

$$E_{\text{trip_mot}} = mgh\eta_1. \quad (5)$$

式中, m 为游动系统质量, kg; h 为立根高度, m。

1.5 补偿绞车节能机理

绞车补偿系统是一套典型的大惯性、大负载、周期性运动控制系统, 在补偿过程中, 如果能够将平台被海浪举升时释放的大量能量以及绞车回转系统的惯性动能进行有效回收与再利用, 将会大幅度降低系统的功率及能耗, 同时提高系统的工作能力。此外, 在送钻与起下钻作业中, 钻柱的部分重力势能也可以进行回收与再利用, 会进一步降低补偿系统的能耗。

能量存储型式有机械式储能、电储能、液压储能; 其中液压储能方式的能量密度较小, 但功率密度最大, 循环效率高, 设备成本低, 且不会对海洋环境造成化学污染, 适用于频繁往复运动系统。

针对绞车补偿系统的特点, 提出了一套基于液压能量回收技术的驱动方案, 通过对钻柱负载的重力势能与绞车回转系统的惯性动能进行回收与再利用, 有效降低系统能耗, 并且可以在不增加系统能耗的前提下, 采用大滚筒结构, 从而减轻了钻井钢丝绳的折弯效应, 提高了钢丝绳的使用寿命。

1.6 补偿绞车运动耦合机理

在海洋浮式钻井过程中, 钻机须同时实现补偿与送钻功能。对于传统的游车大钩和天车补偿系统来说, 通过控制专用补偿液压缸的行程实现补偿运动, 通过控制常规钻井绞车连续下放钻柱实现自动送钻运动, 因此对这两种运动的控制是自然分开的。

海洋钻井补偿绞车虽然有利于简化钻机结构, 但控制对象只有绞车, 难以同时实现两种运动; 而且升沉补偿过程和钻进过程的工作参数、控制策略相差比较悬殊, 钻压检测信号也存在明显波动, 使绞车

升沉补偿与自动送钻运动存在运动及动力上的相互耦合干涉。将两套运动控制系统结合在一起,互不干涉,是海洋钻井补偿绞车的关键技术之一。

2 补偿绞车节能驱动方案

2.1 基于能量回收的液压驱动方案

设计了一套基于能量回收的补偿绞车液压驱动方案,利用多台液压二次调节元件与定量液压马达替换交流变频电机,共同驱动绞车完成升沉补偿、自动送钻、起下钻等海洋钻井作业。

补偿绞车的液压驱动方案原理如图 3 所示。包括恒压变量泵、发动机、溢流阀、减压阀、电液伺服阀、控制液压缸、倾角传感器、二次调节元件、定量液压马达、隔离阀、失电保护阀、补油阀、双活塞式蓄能器、高压氮气瓶、PLC、绝对型旋转编码器、运动参考单元(MRU, motion reference unit)、井下钻压测量装置。双活塞式蓄能器与高压气瓶组成液压蓄能器,液压蓄能器与恒压变量泵组成恒压网络。

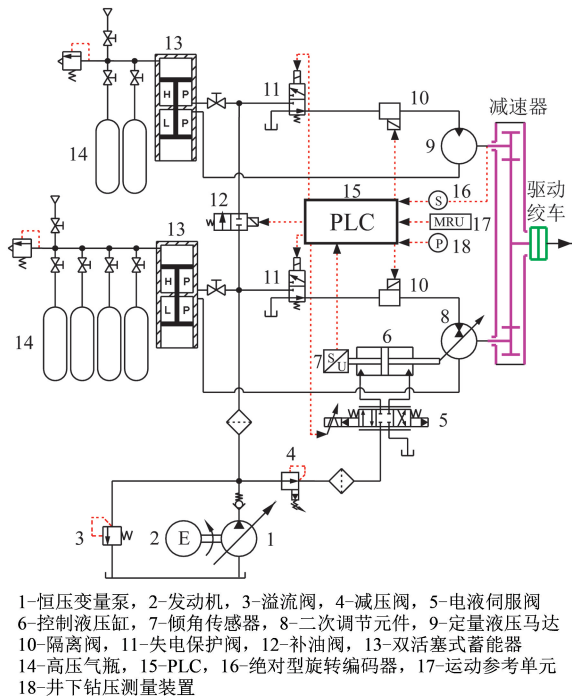


图 3 液压动力系统原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of hydraulic power system

2.2 液压驱动方案的工作原理

在钻进过程中 PLC 根据绝对型旋转编码器检测到的绞车轴角位移信号、运动参考单元检测到的平台升沉信号、井下钻压测量装置检测到的钻压信号、倾角传感器检测到的液压二次调节元件斜盘角度信号,向电液伺服阀发出控制信号,通过调节控制液压缸活塞杆的位置来控制液压二次调节元件的斜

盘倾角,实时改变二次调节元件的输出扭矩,从而驱动绞车实现补偿、送钻等作业过程(图 3)。

在升沉补偿运动过程中,蓄能器通过定量液压马达承担钻柱的部分静载荷,并利用液气弹簧特性对钻柱重力势能进行周期性的存储与释放(平台上升时存储能量,平台下降时释放能量);液压二次调节元件工作于恒压网络中,仅用于克服补偿运动过程中的其余载荷,通过调节其斜盘倾角实现对输出功率、扭矩及转速等变量的调节,能够无损耗地从恒压网络获取能量,并利用蓄能器对绞车回转系统的惯性动能进行周期性存储与释放(绞车减速时存储能量,绞车加速时释放能量)。

在自动送钻运动过程中,钻柱下放的重力势能也转化为液压能存储在蓄能器中,然后在接立根的过程中释放出来,用于提升钻机的游动系统。在起下钻运动过程中,液压二次调节元件与定量液压马达共同举升或下放钻柱,并利用蓄能器对钻柱或钻机游动系统的部分重力势能与制动能量进行回收与再利用。

图 3 中,双活塞式蓄能器采用一个可滑动的活塞组件将蓄能器分隔为四个腔室,气腔与高压氮气瓶相连,液压高压腔与液压低压腔分别与液压执行元件的高压腔、低压腔相连,实现了容积耦合,从而提高了液压执行元件在泵工况时的吸油能力,减小了高低压油腔的压力波动,提高了蓄能器的储能能力^[18]。

隔离阀和失电保护阀安装于双活塞式蓄能器与液压执行元件之间。隔离阀具有压力感应功能,当发生钻柱脱断、钢丝绳断裂或液压软管损坏等事故时,隔离阀自动关闭,切断液压执行元件的高压油源,实现失载保护功能。失电保护阀在正常工作状态下处于接通状态,当系统电力供应突然停止时,失电保护阀在弹簧的作用下复位,切断液压执行元件的高压油源,实现失电保护功能。

综上所述,液压驱动系统采用液压容积调速方式,无溢流损失,并且可以对钻柱的重力势能及绞车回转系统的惯性动能进行回收与再利用,改善了发动机—液压系统—负载的功率匹配,可以有效降低补偿绞车的能耗。

3 补偿绞车的解耦控制方案

为了解决钻井补偿绞车运动耦合的问题,提出了基于恒钻压反馈控制、基于差动行星传动、基于双绞车驱动的软硬件解耦控制方案。

3.1 基于钻压闭环的软件解耦方案

升降补偿和自动送钻运动的控制策略虽然相差较大,但均以控制井底钻压稳定为目的,因此可以直接以钻压作为反馈信号建立闭环系统。

图 4 为基于恒钻压反馈控制的软件解耦方案。采用外环钻压闭环、内环二次调节元件斜盘倾角闭环的双层控制结构,驱动绞车同时完成补偿与送钻运动。钻压控制器采用模糊算法^[19],斜盘控制器采用 PID(proportion-integral-derivative)算法。

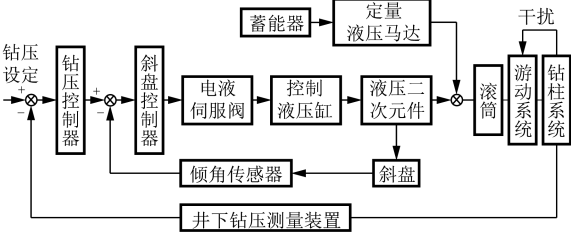


图 4 基于恒钻压反馈控制的软件解耦方案

Fig. 4 Software decoupling scheme based on constant drilling pressure feedback control

3.2 基于差动行星传动的硬件解耦方案

基于差动行星传动的补偿绞车如图 5 所示。将齿轮减速器替换为差动行星齿轮减速器。差动行星减速器具有双动力输入、单输出的特点,外齿圈上布置的多根输入轴与多台定量液压马达、液压二次调节元件相联以实现升降补偿运动;太阳轮输入轴与送钻液压马达相联实现自动送钻运动;行星架与绞车滚筒轴相联,驱动绞车同时完成补偿与送钻运动。

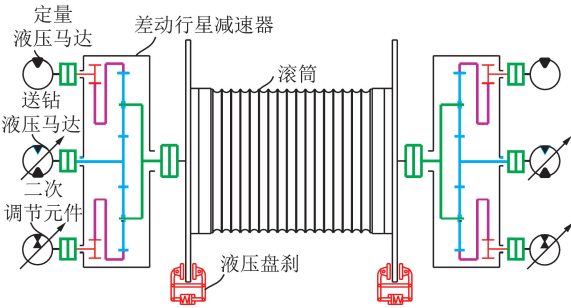


图 5 基于差动行星传动的补偿绞车

Fig. 5 Compensation drawworks based on differential planetary transmission

为提高运动控制精度,降低两套控制系统之间的干扰程度,基于差动行星传动的补偿绞车采用双闭环控制结构,如图 6 所示。补偿运动采用外环大钩位移闭环、内环二次调节元件斜盘倾角闭环的双层控制结构;自动送钻采用外环钻压闭环、内环送钻液压马达转速闭环的双层控制结构。钻压控制器采用模糊算法,位移、斜盘及转速控制器均采用 PID 算

法。

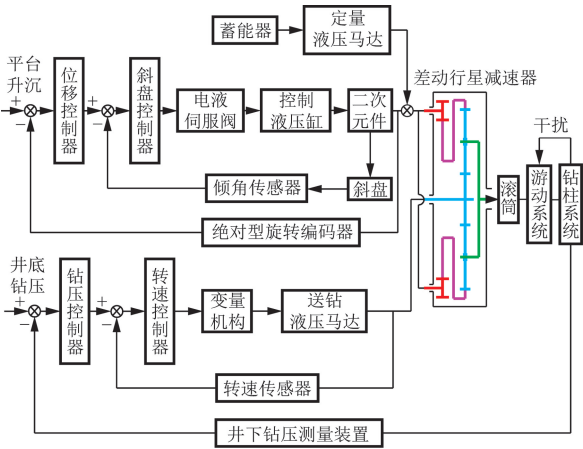


图 6 基于差动行星传动的补偿绞车控制结构

Fig. 6 Control structure of compensation drawworks based on differential planetary transmission

3.3 基于双绞车驱动的硬件解耦方案

基于双绞车驱动的硬件解耦方案如图 7 所示。

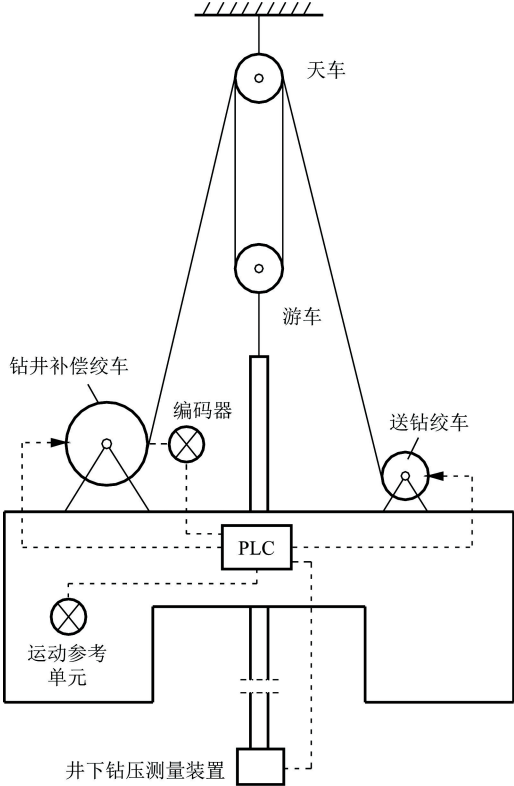


图 7 基于双绞车的硬件解耦方案

Fig. 7 Hardware decoupling scheme based on dual drawworks

该方案利用钻井钢丝绳死绳、快绳两个运动输入端,在快绳端布置一台补偿绞车,完成升降补偿及起下钻等功能;在死绳端布置一台送钻绞车,完成自动送钻、应急起升井架及钻柱等功能;从而实现了钻井过程中升降补偿与自动送钻运动的解耦控制。

4 系统仿真

4.1 设计参数

根据深水浮式钻井平台的技术规格,以名义钻井深度 12 190 m、最大补偿速度 1.4 m/s 为设计指标,设计计算了绞车补偿系统及井下钻具的主要结构参数^[20-21]如下:最大补偿载荷 550 t,送钻速度 30 m/h,井底钻压 20 t,允许的钻压波动 ± 10 kN,最大钻柱质量 470 t,游动系统质量 80 t,钻柱的泥浆阻力系数 $16\,116\text{ N}\cdot\text{s/m}$,主滚筒尺寸 $\Phi\,2\,000\times 2\,082\text{ mm}$,电机轴折算转动惯量 $800\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,绞车传动效率 0.97,配备定量液压马达 14 台 $\times 425\text{ kW}$,配备液压二次调节元件 6 台 $\times 750\text{ kW}$,配备恒压变量泵 6 台 $\times 640\text{ kW}$,液压执行元件效率均为 0.95,游动系统绳数 14 根,钢丝绳直径 52 mm,单位长度钢丝绳刚度 $1.6\times 10^6\text{ N/m}$,单个滑轮片传动效率 0.99。

4.2 系统仿真

海洋钻井绞车升沉补偿系统主要包括 PLC 控制系统、信号检测系统、液压驱动系统、机械传动系统、钻机起升系统^[22]。利用 AMESim 软件建立了各个环节的模型,并进行了仿真研究。

将浮式钻井平台的升沉运动简化为正弦规律,并利用系统仿真模型针对不同升沉波形进行测试。

4.2.1 补偿与送钻过程的解耦控制效果

补偿载荷为 550 t、平台升沉周期为 15 s、送钻速度为 30 m/h 时,不同升沉行程时的钻压波动见图 8。

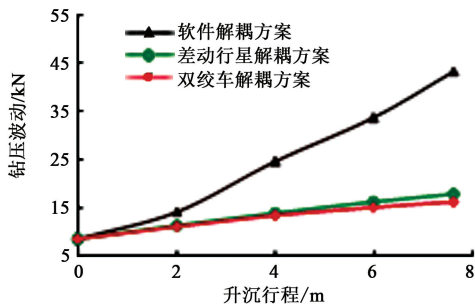


图 8 不同升沉行程时的钻压波动量

Fig. 8 Variation of drill pressure under different heave displacement

仿真结果表明:由于钻压信号难以精确测量,并存在一定滞后,因此基于恒钻压反馈控制的软件解耦方案效果很差,系统运行不稳定。基于差动行星传动与基于双绞车驱动两种硬件解耦方案控制效果较好,钻压波动在 $\pm 10\text{ kN}$ 以内,满足设计指标。

基于双绞车驱动的解耦方案在运动与动力上实现了对补偿与送钻两种运动的完全解耦,两套运动

控制系统之间互不干扰,控制精度较高。

基于差动行星传动的解耦方案虽然实现了补偿与送钻运动的解耦,但两套控制系统在动力上仍然存在一定耦合,即差动行星减速器外齿圈上的补偿运动对太阳轮上的送钻运动存在一定干扰,因此控制精度略低于双绞车解耦方案。

4.2.2 补偿与送钻过程的节能效果

图 9 为补偿载荷 550 t、平台升沉周期 15 s、送钻速度 30 m/h 时,不同升沉行程时的补偿系统单周期能耗。由图 9 可见,液压驱动方案的能耗仅占纯电动驱动方案能耗的 40.8 % ~ 42.2 %。

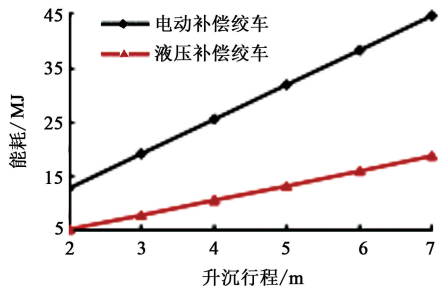


图 9 不同升沉行程时的补偿系统单周期能耗

Fig. 9 Single cycle energy consumption of compensation system under different heave displacement

平台升沉周期 15 s、升沉行程 7 m、送钻速度 30 m/h 时,不同井深时的补偿系统单周期能耗见图 10。由图 10 可见,液压驱动方案的能耗仅占纯电动驱动方案能耗的 39.3 % ~ 42.2 %。

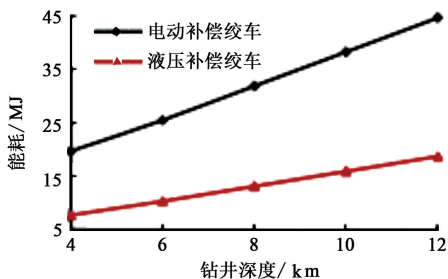


图 10 不同井深时的补偿系统单周期能耗

Fig. 10 Single cycle energy consumption of compensation system under different well depth

仿真结果表明,在不同海况与钻井工况下,补偿绞车的新型液压驱动方案具有明显的节能效果。

5 试验

5.1 试验系统原理

以载荷 2.3 t、升沉幅值 0.8 m、升沉周期 15 s、送钻速度 13.4 m/h 为指标,研制了补偿绞车原理样机及试验系统^[23],如图 11 所示。由图 11 可见,试验系统包括升沉模拟/送钻绞车、负载模拟系统、补偿

绞车原理样机,分别实现造波/送钻、加载、补偿等试验功能,可以针对不同海况、不同控制方案、不同驱动方案进行试验测试。

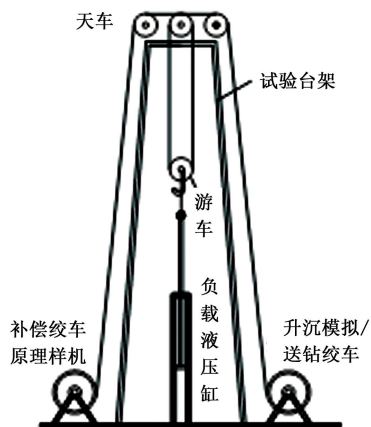


图 11 试验系统原理

Fig. 11 Schematic diagram of test system

5.2 试验结果

5.2.1 补偿与送钻过程的解耦控制试验效果

图 12 为载荷 2.3 t、升沉周期 15 s、采用硬件解耦控制方案时,不同升沉幅值时的大钩位移幅值。由图 12 可见,解耦控制效果良好。

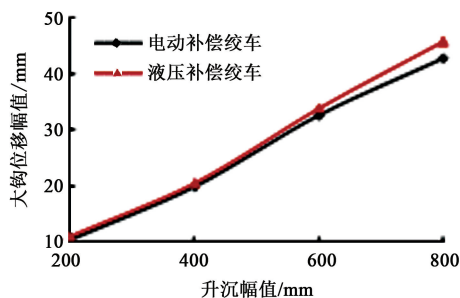


图 12 不同升沉幅值时的大钩位移幅值

Fig. 12 Hook displacement amplitude under different heave amplitude

图 13 为升沉幅值 800 mm 时的钻压波动曲线。由图 13 可见,在±110 N 以内,基本满足技术要求。

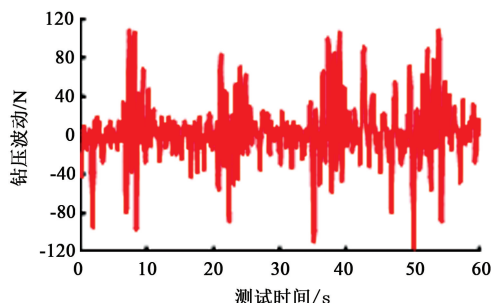


图 13 试验系统的钻压波动量

Fig. 13 Variation of drill pressure of test system

由此可见,基于复合控制的软件解耦方案控制效果很差,难以稳定运行;基于差动行星传动与双绞车驱动的解耦方案控制效果良好,控制精度基本一致。

5.2.2 补偿与送钻过程的节能试验效果

图 14 为载荷 2.3 t、升沉周期 15 s、采用硬件解耦控制方案时,不同升沉幅值时的单周期补偿能耗。由图 14 可见,随着幅值提高,液压驱动方案的能耗仅占纯电动驱动方案能耗的 54.8 % ~ 62.6 %,节能效果明显。

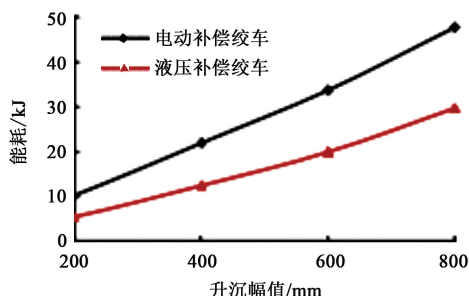


图 14 不同升沉幅值时的单周期能耗

Fig. 14 Single cycle energy consumption under different heave amplitude

6 结 论

(1) 利用定量液压马达与液压二次调节元件共同驱动绞车,系统传动效率较高,并且可以在不同海洋钻井作业过程中对钻柱负载的重力势能与绞车回转系统的惯性动能进行回收与再利用,从而有效地降低系统能耗。

(2) 通过改进控制系统结构与机械传动方式,提出的基于钻压闭环的软件解耦方案、基于差动行星传动的硬件解耦方案、基于双绞车驱动的硬件解耦方案实现了升沉补偿与自动送钻运动的解耦控制。

(3) 新型液压驱动方案相对于电驱动方案的节能效果明显;基于差动行星传动与双绞车驱动的硬件解耦方案控制效果良好;其中,基于双绞车驱动的解耦方案在运动与动力上实现了对两种钻井运动的完全解耦,控制精度更高。

参考文献:

[1] BAKER R J. Improved heave compensation[R]. SPE/IADC 21961, 1991.
[2] WOODACRE J K, BAUER R J, IRANI R A. A review of vertical motion heave compensation systems[J]. Ocean Engineering, 2015, 104: 140-154.
[3] KORDE U A. Active heave compensation on drilling-

- ships in irregular waves[J]. *Ocean Engineering*, 1998, 25(7):541-561.
- [4] BUTLER B. Heave compensation[R]. SPE 4330-MS, 2012.
- [5] EI-HAWARY F. Compensation for source heave by use of a Kalman filter[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1982, 7(2):89-96.
- [6] KIDERS E. At-sea handling and motion compensation; Proceedings of the OCEANS'83[C]. San Francisco: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1983.
- [7] ROBICHAUX L R, HATLESKOG J T. Semi-active heave compensation system for marine vessels: 5209302 A[P]. 1993-05-11.
- [8] DO K D, PAN J. Nonlinear control of an active heave compensation system[J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(5):558-571.
- [9] KÜCHLER S, MAHL T, NEUPERT J, et al. Active control for an offshore crane using prediction of the vessels motion[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(2):297-309.
- [10] 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.
- [11] National Oilwell Varco Limited Company. AHD Drawworks [EB/OL]. [2014-10-17]. http://www.nov.com/segments/rig_systems/offshore/hoisting/drawworks/AHD_drawworks/AHD_drawworks.aspx.
- [12] PennWell Corporation. Active heave drilling drawworks system goes to work[EB/OL]. [1999-04-01]. <http://www.offshore-mag.com/articles/print/volume-59/issue-4/news/general-interest/active-heave-drilling-drawworks-system-goes-to-work.html>.
- [13] KYLLINGSTAD A. Method and apparatus for active heave compensation: 20100057279 A1[P]. 2010-03-04.
- [14] 黄鲁蒙,张彦廷,刘美英,等. 海洋浮式钻井平台绞车升沉补偿系统设计[J]. *石油学报*, 2013, 34(3):569-573.
- HUANG Lumeng, ZHANG Yanting, LIU Meiyang, et al. Design for a drawworks heave compensation system of floating drilling platform[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3):569-573.
- [15] FIVELSTAD O, VERHOEF R, OGG J, et al. Dual active heave drilling drawworks: from concept to operational life[R]. SPE 168019, 2014.
- [16] KYLLINGSTAD A. Dual drawworks provide operational redundancy and reduce cut and slip costs[R]. SPE 79826, 2003.
- [17] 张彦廷,黄鲁蒙,孟德超,等. 海洋钻机补偿绞车能耗计算与试验测试[J]. *石油学报*, 2015, 36(5):620-625.
- ZHANG Yanting, HUANG Lumeng, MENG Dechao, et al. Energy consumption calculation and experimental test for heave compensation drawworks of offshore rig[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5):620-625.
- [18] DORR W, BALTES H, KLOFT P. Dual piston accumulator: 8,746,287 B2[P]. 2014-06-10.
- [19] 郭芙琴,华鹏涛. 参数自适应模糊控制的自动送钻技术研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(6):153-160.
- GUO Fuqin, HUA Pengtao. Research of auto-drilling technology based on parameters'self-adjusting fuzzy Control[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2012, 34(6):153-160.
- [20] Fujian Huisman Steel Manufacturing Limited Company. Vessel designs: huisman product brochure [EB/OL]. [2013-09-04]. http://www.huisman-cn.com/Cms_data/contents/huisman/folders/magazines/~contents/6G72BYSKRZ8PSM7D/brochure-vessel-design-2013-1.pdf.
- [21] 柯珂,管志川,王志远,等. 修正设计系统的套管层次与下入深度设计方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(2):76-81.
- KE Ke, GUANG Zhichuan, WANG Zhiyuan, et al. An improved casing design method and its application in deepwater drilling[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2016, 40(2):76-81.
- [22] HUANG Lumeng, ZHANG Yanting, ZHANG Lei, et al. Semi-active drilling drawworks heave compensation system[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5):665-670.
- [23] 张彦廷,黄鲁蒙,孙选建,等. 半主动式补偿绞车的液压试验系统[J]. *液压与气动*, 2016(4):38-44.
- ZHANG Yanting, HUANG Lumeng, SUN Xuanjian, et al. Hydraulic experimental system for semi-active heave compensation drawworks[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2016(4):38-44.