

电液混合式修井机起升系统结构与动力学分析

喻高远 肖文生 崔俊国 王宏敏 张信杰

(中国石油大学(华东)石油石化新型装备与技术教育部工程研究中心, 山东 青岛 266580)

摘要: 提出一种新型外转子永磁同步电机绞车结构, 将外转子永磁同步电机内置于绞车串联使用, 设计电液混合式修井机起升系统结构; 与发动机、三相异步电动机比外转子永磁同步电机具有效率高的优点; 认为外转子永磁同步电机作为一种优势明显的新型驱动装置值得油田修井作业推广应用。校核了起升系统的绞车、天车滑轮、井架等关键结构。建立了考虑井架刚度和钢丝绳弹性的系统动力学模型, 从理论和仿真分析了起升系统的动态响应。结果表明: 起升系统工作稳定, 能够满足修井机设计性能要求, 为电液混合式修井机深入研究提供参考。

关键字: 外转子永磁同步电机 绞车 起升系统 动力学

中图分类号: TE935

The Design and Dynamic Analysis of Hybrid-electric Hydraulic Worker Hoisting Mechanism

XIAO Wensheng, YU Gaoyuan, CUI Junguo, WANG Hongmin, ZHANG Xinjie

(Research Center of New Petroleum and Petrochemical Equipment and Technology(China University of Petroleum(East China)), Ministry of Education, Qingdao 266580, China)

Abstract: A new winch with external rotor permanent magnet synchronous motor(ERPMSM) is proposed. The hoisting mechanism of hybrid-electric worker is designed by series connecting ERPMSM with winch and placing ERPMSM into winch. Compared with engine and induction motor ERPMSM has higher efficiency. As a new type driving device with significant advantages ERPMSM is worth popularization and application in workover. The winch, crown pulley and derrick of hoisting mechanism were checked. The dynamic model of hoisting mechanism is built considering derrick stiffness and wire rope elasticity. The theory and simulation method is employed to solve for dynamic response of the hoisting mechanism. The results shows that hoisting mechanism has a significant performance, which can satisfy the requirement and provide a reference for further research of the hybrid-electric hydraulic worker.

Key words: External Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor (ERPMSM) Winch Hoisting Mechanism Dynamics

0 前言

目前, 修井作业方式中, 双发式修井机占主导地位, 其次是双动力式修井机和电动式修井机。随着石油工业的发展, 对油田作业的能耗水平提出了越来越高的要求, 例如在修井作业领域, 对低能耗的需求更加迫切。双发式修井机和双动力式修井机传动系统复杂, 系统效率低, 布局困难; 电动式修井机多采用三相异步电机, 外置, 布局相对简单, 但三相异步电机的效率和功率因数较低。近年来, 为了降低修井作业能耗, 国内外学者、机构研究、改进、开发了多种新型的绞车, 如: AC-AC 电驱动、DC-DC 电驱动、AC-SCR-DC 电驱动、AC 变频电驱动等^[1-2]。德国的 Wirth 公司、Bentec 公司、Varco

公司, 美国的 Varco 公司, 法国的 Alston 公司等对修井机的起升系统动力学特性进行了研究^[3]。国内, 侯勇俊、杜小平、姜士湖等采用仿真技术对不同型号的修井机进行了分析^[4-5], 聂文平、肖易萍等采用动力学理论对自动吊环吊卡的的动力学模型进行了研究^[6], 但大多数的学者没有改变修井机绞车结构形式。本文采用外转子永磁同步电机内置于绞车串联使用, 设计了电液混合式修井机起升系统结构。通过有限单元法计算了井架等效刚度。同时, 本文还建立了考虑井架刚度和钢丝绳弹性的系统动力学模型, 从理论和仿真分析了起升系统的动态响应。结果表明: 起升系统工作稳定, 能够满足修井机设计性能要求, 为电液混合式修井机深入研究提供参考。

1 电液混合式修井机整体设计

1.1 设计的总体要求及布局

电液混合式修井机主要技术参数见 1。

表 1 电液混合式修井机设计参数

产品型号	小修井深/m	大修井深/m	钻井深度/m	最大钩载/KN
DC-XJ350	4000	3200	1000	900
绝缘等级	电压/V	频率/Hz	井架高度/m	电机功率/KW
F	380/460	50/60	29	220

考虑设备性能和尺寸要求，确定设备布局见图 1: L 为整车的长度，18500mm，整车宽度 2900mm；整车高度 4200mm。底盘采用 12*8 驱动形式，选用卡特（底特律、康明斯）发动机，液压起升双节井架，配二层台。

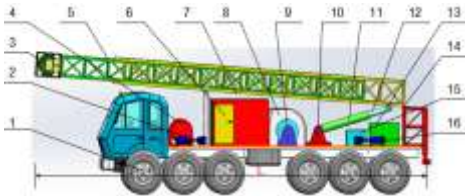


图 1 电液混合式修井机整体布局

1. 底盘 2. 油泵 3. 天车 4. 液压油箱 5.井架上体 6. 操作室 7. 井架下体 8. 轿车挡罩 9. 外转子电机绞车 10. 起升液缸支座 11.起升液缸缸套 12. 起升液缸柱塞 13. 控制箱 14. 井架支撑底座 15. 润滑油箱 16. 润滑油泵

1.2 外转子永磁同步电机绞车设计计算

针对目前我国修井作业传动复杂、效率低、耗能高等缺点，采用外转子永磁同步电机直驱单轴绞车一体式结构，基于花键套筒轴同步锁定，实现永磁同步电机外转子与绞车轮毂同步。绞车整体结构见图 2。

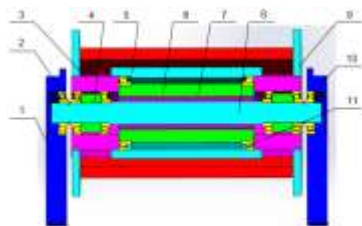


图 2 外转子永磁同步电机绞车

1. 绞车支撑座 2. 轴承定位挡圈 3. 花键套筒轴 4.辅助轴承定位套筒 5.电机外转子 6. 电机转子轭 7. 电机定子 8. 中心轴 9. 轮毂 10. 中心轴端部支撑轴承 11.电机外转子支撑轴承

外转子永磁同步电机绞车共用中心轴，依次与电机定子、电机转子轭、支撑轴承、电机外转子、花键套筒轴、辅助轴承定位套筒、绞车轮毂连接。工作时，根据控制指令确定永磁同步电机外转子的转速，直接驱动绞车进行工作。这种一体式结构无

需减速装置，提高了系统效率，降低了能耗，节约了成本，具有结构简单、布局方便、工作安全可靠等优点。

根据设计要求，确定电机最大外径 595mm；电机最大轴向长度 1200mm，传统滚筒尺寸设计取决于快绳最大拉力 P:

$$N = \frac{PV_{快}}{\eta_{传}\eta_{游}} \quad (1)$$

式中:N 表示电机功率， $V_{快}$ 表示大钩最大速度，为 3m/s； $\eta_{传}$ 表示外转子电机电能转化效率，0.98； $\eta_{游}$ 表示滚筒缠绳及滚筒轴效率，0.96。

初步计算滚筒直径和有效长度^[7]:

$$\begin{aligned} L &= 1674 \log P - 2670 = 988mm \\ D &= 734 \log P - 1012 = 593mm \end{aligned} \quad (2)$$

式中: L 表示滚筒有效长度，mm；D 表示滚筒有效外径，mm。考虑电机尺寸，取：绞车有效长度 L=1200mm，D=700mm。

为减少钢丝绳旋转质量不均匀，并防止滚筒有效长度过长带来的绳槽两端缠绳困难，确定绳槽结构形式为 Lebus 绳槽,见图 3。

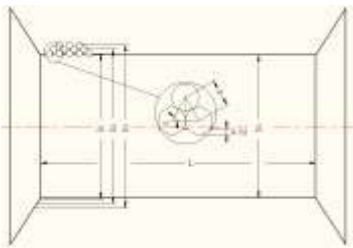


图 3 绞车具体结构尺寸及部分绕绳示意图
缠绳层数:

$$e^2 + \frac{D_0 + (1-\phi)d}{\phi d} e - \frac{D_0 + d}{\phi d} \frac{Zl}{\pi n} = 0 \quad (3)$$

式中: e 表示缠绳层数; D0 表示滚筒外径，mm；d 表示钢丝绳直径，32mm； ϕ 表示缠绳半径增量系数，0.9；Z 表示有效绳数，8；l 表示立根长度，27m；n 表示每层排数，为:

$$n = \frac{L}{d + \Delta} \approx 37 \quad (4)$$

式中: Δ 表示排绳间隙，取 1mm。将式 (3) 和式 (4) 代入式 (3) 得:

$$e = 3 \quad (5)$$

平均缠绳直径为:

$$\begin{aligned} D_m &= D_2 = D_1 + 2\phi d = D_0 + ... \\ ... (2\phi - 0.4d) &= 847.2mm \end{aligned} \quad (6)$$

1.3 天车设计计算

根据标准 SYT 5202-2004 石油修井机中关于游车大钩的规定及表 1 相关设计要求，选定游车大钩

型号 YG90;游系结构 3×4。选定钢丝绳规格为:6×19 类光面/绳式钢芯钢丝绳,直径 32mm^[8]。根据钢丝绳规格,查阅标准^[9],设计得滑轮绳槽底半径 17mm,绳槽粗糙度 6.3mm,绳槽两侧面夹角 40°,机构工作级别 M7,滑轮直径 900mm,滑轮底径 868mm,滑轮外径 970mm。滑轮轮缘材料 35CrMoA,轮毂材料 35#,腹板材料 Q345-B,安装位置天车轴。经预选和校核后确定轴承型号 N338^[10]。

1.4 井架设计计算

为保证井架刚度和游动系统工作方便性,确定井架结构为液缸起升伸缩式双节套桅杆结构,前开口、倾斜,靠钢丝绳实现稳定^[11],井架结构主要包括:井架下体、井架上体、Y 型支架、锁紧机构、绷绳等,见图 4a。根据 SYT 5202-2004 要求,确定修井机场地绷绳布置见图 4b: $L_1/m-25\pm3$, $L_2/m-25(15)\pm3$, $b_1/m-25\pm3$, $b_2/m-25(15)\pm3$ 。

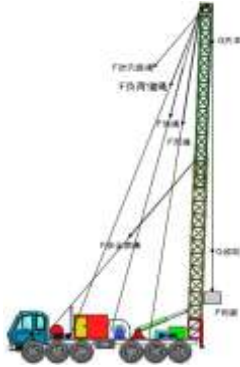


图 4a 井架承载示意图

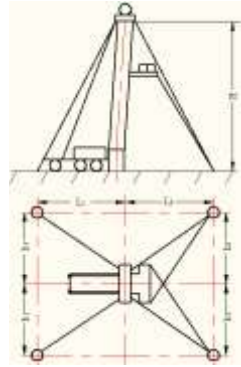


图 4b 场地绷绳位置图

考虑井架设计过程中需要承受的最大立根重量、立根长度、风载等级、地震裂度等因素,参照 API4F 的相关标准,确定井架基本参数:井架高度 29m,井架工作时倾角 3.8°,设计预期风速 47m/s,设计工作起升风速 12.7m/s。井架材料:井架主体,角钢,规格 125×12,材料 Q345;横撑,角钢,规格 75×8,材料 Q235;斜撑,角钢,100×10, Q235。

2 修井机起升系统关键设备校核

2.1 外转子永磁同步电机校核

根据修井机实际工作过程,确定外转子永磁同步电机绞车滚筒受力见图 5。

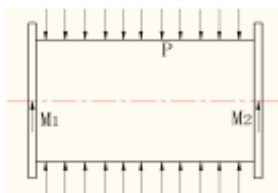
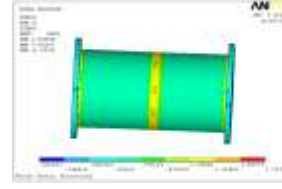


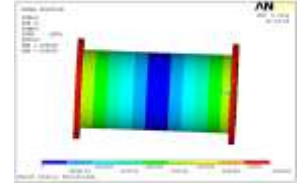
图 5 外转子永磁同步电机绞车滚筒受力图

图 5 中, $M_1=M_2=M$ 电机/2, KN m; P 表示滚筒表面压力, KN; 滚筒及其轮毂采用的材料为:

Q345-B,材料性能指标:弹性模量/Pa, 2.06×10^{11} ;泊松比, 0.3; 密度/(g/cm³), 7.85。在 ANSYS 中建立有限元模型,分析结果见图 6a, 6b。绞车最大应力 1.746MPa, 远小于许用应力; 最大应变 0.0056m, 小于许用应变,符合设计要求。



6a 绞车等效应力云图



6b 绞车应变云图

2.2 天车滑轮校核

滑轮在工作状态下,受力分析见图 7。

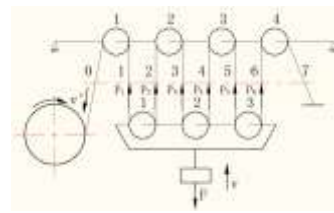


图 7 滑轮受力图

由图 7 可知,滑轮在变速工作状态下,其所受力 $P_i(i=1,2,3,4,5,6)$ 为:

$$\sum_{i=1}^6 P_i = G_{gou} + G_{max} \quad (7)$$

式中, G_{gou} 表示大钩重量, G_{max} 表示最大钩载,取快绳所在天车滑轮进行受力分析,其微元受力分析见图 8。

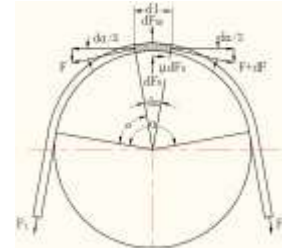


图 8 天车滑轮微元受力图

假设天车滑轮 1 在钢丝绳拉力 F_1 和 F_2 的作用下,钢丝绳在滑轮 1 上的包角为 α ,根据静力学平衡方程可得钢丝绳相对滑轮转动时,钢丝绳上沿着微元法向的平衡方程为:

$$F \sin \frac{d\alpha}{2} + (F + dF) \sin \frac{d\alpha}{2} - dF_N - dF_{Nc} = 0 \quad (8)$$

式中: F 表示钢丝绳在角度为 θ 时的截面拉力, dF_N 表示微元钢丝绳的正压力, dF 表示微元截面拉力增量(即钢丝绳与天车滑轮之间的摩擦力), dF_{Nc} 表示钢丝绳的离心力。联立式(7)、式(8)并化简:

$$P_\theta = 87.1 F_2 e^{\mu(\alpha-\theta)} \quad (9)$$

式中, P_θ 表示钢丝绳在 θ 角度时天车滑轮所受

到的压力， μ 表示摩擦因数，0.2。在 ANSYS 中施加沿着接触面周向变化的压力，计算结果见图 9a、9b，滑轮在动态受力条件下，最大应力值 95.65MPa，天车滑轮的屈服强度 835MPa，安全系数 8.9；最大变形量为 0.0645mm，满足变形刚度要求。故滑轮设计符合要求。

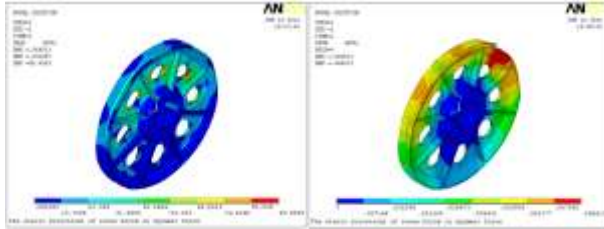


图 9a 滑轮等效应力云图 图 9b 滑轮等效应力云图

2.3 井架校核

采用节点建模对修井机在预期风等候工况和正常风工作进行校核。井架承受的载荷主要包括：恒定载荷、风载荷、工作载荷等。恒定载荷主要包括井架自重、井架支撑设备（包括天车、游车、大钩、吊卡、钢丝绳等）的重量，支撑设备的质量 4P1 可均布于井架最上面的四个节点或者关键点上，见图 10。井架自重 P_i 可按照各部分分别计算并作用于相应各层节点或关键点上，井架恒定载荷质量：井架各层重量 (Kg) 123.4535×4；天车质量 (Kg)，1640.481；游车+大钩 (Kg)，2000；钢丝绳重量 (Kg)，254.88。

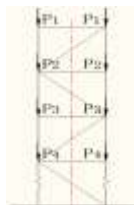


图 10 井架恒定载荷分配图

工作载荷为最大钩载，井架所承受风载：

$$F_{wind} = 0.6115 \cdot K_i \cdot V_{des}^2 \cdot C_s \cdot A \quad (10)$$

式中： F_{wind} 表示单个构件所受风力，N； K_i 表示井架倾角系数， $K_i = \sin^2 \alpha$ ； V_{des} 表示最小额定设计风速， C_s 表示外形系数，取 1.5。校核工况有四种，分别为：工作风从侧面吹、工作风后面吹、预期风侧面吹、预期风后面吹。利用 ANSYS 求得各工况下最大等效应力与最大位移如表 2 所示。

表 2 各工况最大等效应力、位移结果汇总表

工况		风从侧面吹	风从后面吹
工作风	应变结果 (m)	0.0387	0.0193
	应力结果 (MPa)	191	172
预期风	应变结果 (MPa)	0.2156	0.0910
	应力结果 (m)	160	81.6

井架静强度条件为^[12]：

$$\sigma \leq f \quad (11)$$

式中： σ 为最大等效应力，Mpa； f 为材料设计强度，345MPa。根据表 2 和式 (11) 可知井架工作载荷满足静强度条件，故：井架初步设计满足要求。井架等效刚度：

$$k = F / s \quad (12)$$

式中： F 为该方向所施加的外力，948.16KN； s 为外力所引起的该方向的变形，由表 2 求得平均变形，0.09m。故，井架刚度为：

$$k = 948160 / 0.09 = 1.04 \times 10^7 \quad (13)$$

3 起升系统动力学分析

3.1 运动学分析

修井机起升系统主要包括永磁同步电机驱动单轴一体式绞车—钢丝绳—井架—天车—游车大钩—钻柱。实际模型计算复杂，为简化计算，需要对起升系统按其受力特点和结构进行简化，简化时作以下基本假设^[13-14]：

(1) 忽略钢丝绳与滑轮之间的相互作用，不计钢丝绳能量消耗。

(2) 弹性系统只考虑竖向振动，忽略系统水平振动和扭转振动。

(3) 天车、游车、大钩等作刚性处理。

(4) 系统总体能量守恒。

根据以上假设，在修井机工作过程中，将起升系统简化为三质量三刚度弹性系统，见图 11： m_1 为第一折算质量，3902.7Kg，是滚筒部分被动质量在第二层缠绳半径上的简化； m_2 为第二折算质量，7895Kg，是游车大钩、钢丝绳等在大钩出的简化； m_3 为第三折算质量，9947Kg，是指钻柱质量在其质心位置的简化。 C_s 为钢丝绳刚度， 3.35×10^6 ； C_d 为井架刚度； C_2 表示钻柱刚度， 4.31×10^6 。 $R(t)$ 表示滚筒剩余拉力。

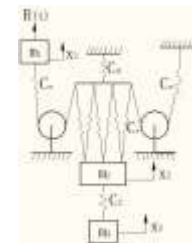


图 11 修井机起升系统动力学模型

系统动能：

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 m_i (\dot{x}_i)^2 \quad (14)$$

式中： T 表示弹性系统动能。系统弹性势能：

$$U = \frac{1}{2} C_n (x_1 - kx_2)^2 + \frac{1}{2} C_2 (x_2 - x_3)^2 \quad (15)$$

式中, C_n 表示井架、钢丝绳、天车折算刚度:

$$C_n = \frac{(2C_s + C_d)kC_s}{k^2\eta_2((2C_s + C_d) + kC_s)} = 4 \times 10^5 \text{ N/m} \quad (16)$$

根据假设 (4) 可得:

$$T + U = R(t)x_1 \quad (17)$$

对式 (14) 中 x_i 求偏导数可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{2} \sum_1^3 m_i (\dot{x}_i)^2 \right) = m_i \dot{x}_i \frac{\partial}{\partial x_i} (\dot{x}_i) \\ &\dots = m_i \dot{x}_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{dx_i}{dt} \right) = m_i \dot{x}_i \frac{\partial T}{\partial t} \left(\frac{dx_i}{dt} \right) \frac{\partial t}{\partial x} \\ &\dots = m_i \dot{x}_i \frac{d^2 x}{dt^2} \frac{1}{\dot{x}_i} = m_i \frac{d^2 x}{dt^2} \end{aligned} \quad (18)$$

将式 (15) 代入式 (17) 并在方程两边同时对 x_i 求偏导可得:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} = R(t) - (x_1 - kx_2)C_n \\ m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} = (x_1 - kx_2)kC_n - (x_2 - x_3)C_2 \\ m_3 \frac{d^2 x}{dt^2} = (x_2 - x_3)C_2 \end{cases} \quad (19)$$

式中: x_i ($i=1,2,3$) 表示不同位置折算质量位移。利用 matlab 中函数 ode45 求解得三部分速度特性见图 12。

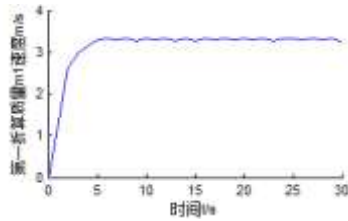


图 12a 第一折算质量 m_1 速度

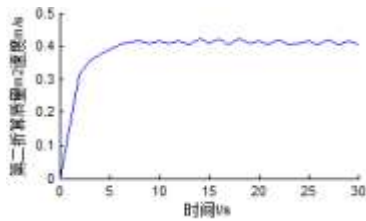


图 12b 第二折算质量 m_2 速度

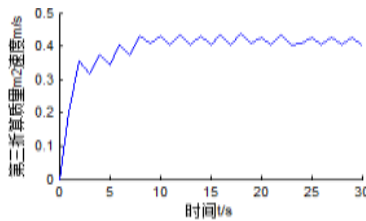


图 12c 第三折算质量 m_3 速度

从图 12(a)中可以看出, 绞车滚筒的速度变化比较平稳, 平均速度为 3.3m/s。大钩处的速度稳定在 0.4m/s, 其速度波动量为 0.01, 系统较为平稳。钻柱

质心处速度稳定在 0.4m/s, 其速度波动量为 0.11, 相对于大钩有所增加, 主要受钻柱弹性影响。总体来看, 系统波动量较小, 工作平稳。

3.2 动力学分析

DC-XJ-350 修井机起升系统负责起升工作的绞车结构为外转子电机驱动单轴一体式绞车型式, 无减速传动机构, 滚筒上缠绕的钢丝绳经过天车、游车后带动大钩完成钻柱的起升功能。将系统简化为三质量二联结扭转弹性系统来进行分析, 见图 13。

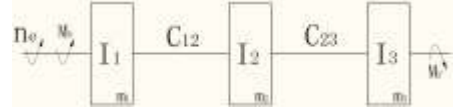


图 13 修井机起升系统动力学模型

图中, m_1 为电机外转子折算质量, I_1 为第一折算质量转动惯量, 198Kg m^2 ; m_2 为滚筒轴被动部分折算于第二层缠绳半径质量, I_2 为第二折算质量转动惯量, 856Kg m^2 ; m_3 天车、游车、钻柱等折算质量, I_3 为第三折算质量转动惯量, 173Kg m^2 ; M_r 起升系统折算静阻力矩, 18.81KN m , M_N 为输入电机扭矩特性曲线。

为进行起升系统仿真计算, 需作如下简化假设, 以建立系统运动方程组, 假设如下:

- (1) 各部分折算质量给予零位移初始条件;
- (2) 静阻力矩作用使得各弹性联结发生变形, 故角位移起始坐标为静止位置;
- (3) 钻杆在井下时, 井壁摩擦、泥浆粘滞阻力、浮力等因素在起升过程中相互抵消忽略不计。

分别选择三部分质量作为研究对象, 得各部分的受力图见图 14。



图 14 系统各部分受力图

根据图 14 可得系统方程组如下示:

$$\begin{aligned} M_{12} &= M_r + C_{12} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ I_1 \theta_1'' &= M_N - M_{12} \\ M_{23} &= M_r + C_{23} \cdot (\theta_2 - \theta_3) \\ I_2 \theta_2'' &= M_{12} - M_{23} \\ I_2 \theta_2'' &= M_{12} - M_{23} \\ I_3 \theta_3'' &= M_{23} - M_r \end{aligned} \quad (20)$$

式中: θ_i ($i=1,2,3$) 为各部分折算质量的角位移; M_{12} 为折算质量一、二之间弹性连接内的扭矩; M_{23} 为折算质量二、三之间弹性连接内的扭矩。上

式进行整理后并进行拉普拉斯变换可得:

$$\begin{cases} I_1 S^2 \theta_1 = M_N(s) - M_r - C_{12}(\theta_1 - \theta_2) \\ I_2 S^2 \theta_2 = C_{12}(\theta_1 - \theta_2) - C_{23}(\theta_2 - \theta_3) \\ I_3 S^2 \theta_3 = C_{23}(\theta_2 - \theta_3) \end{cases} \quad (21)$$

利用 Simulink 搭建系统模型, 见图 15。

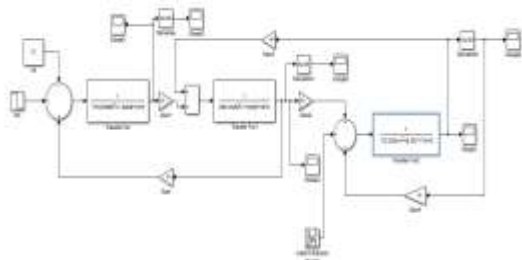


图 15 系统动力学模型

考虑随机载荷为 10KN 时对系统进行仿真, 结果见图 16。

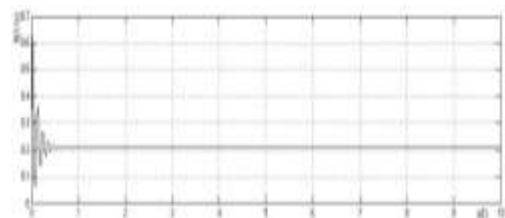


图 16a 第一折算质量角度随时间变化

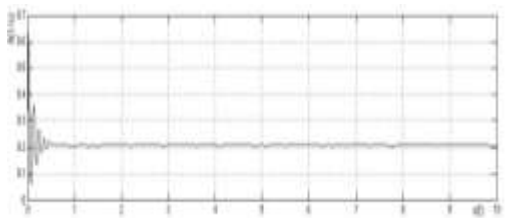


图 16b 第二折算质量角度随时间变化

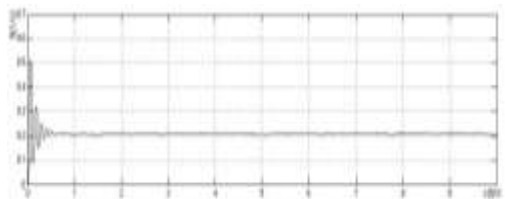


图 16c 第三折算质量角度随时间变化

采用传递函数求得起升系统各部分折算质量的角度均处于稳态, 表明设计所得起升系统具有良好的起升特性, 能够满足修井机的设计要求。

4 结论

本文从结构型式和理论等方面分析了修井作业方式国内外研究进展, 认为外转子永磁同步电机作为一种优势明显的新型驱动装置值得油田修井作业推广使用。使用外转子永磁同步电机获取一体式绞车绞车结构, 设计了电液混合式修井机起升系统。

采用有限单元法校核了起升系统的绞车、天车滑轮、井架等关键结构。建立了考虑井架刚度和钢丝绳弹性的系统动力学模型, 从理论和仿真分析了起升系统的动态响应。结果表明: 起升系统工作稳定, 能够满足修井机设计性能要求, 为电液混合式修井机进一步设计研究和应用提供参考。

参 考 文 献

- [1] S.M J,S.S J,D-W.et al.Comparison of Three Types of PM Brushless Machines for an Electro-Mechanical Battery[J].IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS,2000,36(5):3540-3543
- [2] Peter Kascak,Ralph Jansen,Timothy Dever,et al.Motoring Performance of a Conical Pole-Pair Separated Bearingless Electric Machine[C].2011 IEEE Energytech,2011:1-6
- [3] 谢永金.我国修井机发展的技术现状与展望[J].石油机械, 2005, 33 (10): 72-75.
- [4] 侯勇俊, 杜小平, 艾志久, 郭小波, 甄刚. XJ350 修井机起升系统动力学仿真模型[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20 (4): 60-62.
- [5] 姜士湖. 650 修井机虚拟样机仿真分析研究[J]. 石油机械, 2007, 35 (12): 32-34.
- [6] 聂文平, 肖易萍, 常玉莲, 高胜. 自动吊环吊卡的动力学模型研究[J]. 石油矿场机械, 2009, 38 (9): 9-13
- [7] 杨明旺. 石油系列绞车数值分析与可靠性研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2007. 4:7-9
- [8] 杨海滨, 徐铭, 曹华. 钻井绳索与井场吊运安全操作[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. 2
- [9] 成大先. 机械设计手册—弹簧·起重运输件·五金件[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 1
- [10] 张黎黎, 郑严. 新编机械设计手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008. 5
- [11] 王志强. XJ350 修井机井架设计与试验研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2013. 9:11-13
- [12] 高荣霞, 高学仕. ZJ50/3150LDB 钻机井架的设计和有限元仿真分析[D]. 青岛: 中国石油大学, 2008. 10:11-12
- [13] 王平. 石油钻机电动绞车特性分析及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. 10:60-61
- [14] Deur Josko,Peric Nedjeljko.Analysis of Speed control system for Electrical Drivers with Elastic Transmission.IEEE International Symposium on Industrial Electronics.1999.2

作者简介: 喻高远, 男, 1993 年出生, 中国石油大学 (华东), 硕士。主要研究方向为永磁同步电机优化设计以及新型修井机的开发研究。联系方式: 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号中国石油大学机电工程学院研 14-1, 266580. 手机: 15588600571, Email: 961023731@qq.com