采用SRM的车载试油试采驱动控制系统应用设计

车载试油试采举升装置是一种可以在油井间快速移动的举升装置，为有杆泵提供动力。目前常用的车载试油试采举升装置驱动控制系统为柴油发动机，为了对车载试油试采举升装置进行节能改造，采用液压泵/马达作为平衡配重系统，设计了一种基于STM32F303单片机为控制核心，不对称半桥为功率变换电路，三相12/8极开关磁阻电动机（SRM）为被控对象的开关磁阻电动机控制系统，完成了控制系统相关硬件设计、软件设计以及电气控制柜设计。通过相关调试运行可以验证将控制系统应用在车载试油试采举升装置上能满足有杆泵原有的运行工况，并能提高试油试采效率。

李红伟　陈佩斯　葛茗瑞　刘勇村／西南石油大学电气信息学院
蒋幽君／中国石油渤海石油装备制造有限公司新世纪抽油机公司

李红伟／教授

关键词／Keywords
试油试采·
液压平衡·
开关磁阻电动机·
有杆泵·
节能改造·

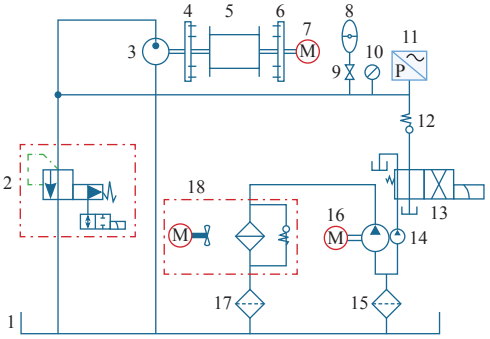
0　引言

试油试采是探明油井开采能力和开发价值的重要步骤，旨在为开发方案中某些技术界限和技术指标提出可行的确定方法[1-2]。试油是利用一套专用的设备和方法，降低开采井内液柱压力，诱导地层中流体进入油井并取得流体产量、压力、温度、流体性质和地层参数等资料的过程。试采是对油田进行小规模或短时间的生产。试油试采装置的核心机构是有杆泵，车载试油试采举升装置是一种可以在油井间快速移动的设备，为有杆泵提供动力，同时具备冲程和冲次可调的抽油装置[3-4]。国内车载试油试采设备大多在修井机基础上改进而来，其动力驱动系统以康明斯QSL9和卡特彼勒CAT C9柴油发动机为主[5]。

本文根据试油试采装置的运行特性，结合开关磁阻电动机自身适用于频繁正反转的优势特性，考虑采用SRM直接驱动试油试采举升装置完成运行。加入液压泵/马达和蓄能器组成的配重系统，主动驱动元件和配重系统共同作用实现有杆泵的上下往复运动[6]，减少传动过程的能量损失[7]，同时简化系统，提高系统的可靠性，降低在边远油井作业的能源消耗。

1　系统原理

本系统的主要执行元件包括两部分：主驱动系统和平衡系统。主驱动系统主要元件为开关磁阻电动机，通过减速器连接绞车一端；平衡系统主要元件为高速泵/马达，通过减速器连接绞车的另一端，绞车采用双轴输出设计。试油试采系统原理简图如图1所示。



1—油箱　2—电磁卸荷阀　3—泵/马达　4—行星齿轮减速器
5—绞车　6—行星齿轮减速器　7—开关磁阻电动机
8—蓄能器　9—截止阀　10—压力表　11—压力变送器
12—单向阀　13—电磁换向阀　14—双联叶片泵
15—吸油过滤器　16—电动机　17—回油过滤器
18—风冷冷却器

图1　试油试采系统原理简图

当有杆泵处于上冲程时，高速泵/马达工作于马达工况，和开关磁阻电动

机（SRM）一同驱动绞车，通过钢丝绳带动有杆泵向上运动；当有杆泵处于下冲程时，开关磁阻电动机驱动有杆泵向下运动，高速泵/马达工作于泵状态，并收集SRM输出能量和有杆泵下降的势能，存于蓄能器中，这部分能量在有杆泵处于上冲程时释放。

开关磁阻电动机控制系统应用于车载试油试采举升装置总体结构框图如图2所示，沃尔沃发电机为电气控制柜提供三相电，开关磁阻电动机控制器外接三相12/8极开关磁阻电动机，电动机转轴通过减速器连接绞车，绞车将电动机的旋转运动转化为直线运动。绞车的滚筒通过钢丝绳连接有杆泵装置，有杆泵速度曲线和位移曲线存储于电动机控制器存储核心单元，经主控系统计算输出与之相匹配的功率变换器元件开通信号和开通时间，从而改变电动机相绕组电压和导通方向，进而改变电动机的转速大小和旋转方向，实现有杆泵的上下往复运动。旋转编码器装在绞车的两端，通过计算高速脉冲数将转速反馈给PLC控制器的高速计数器模块，PLC和控制器互建通信，根据转速偏差量调节输出，实现对有杆泵的精准控制。

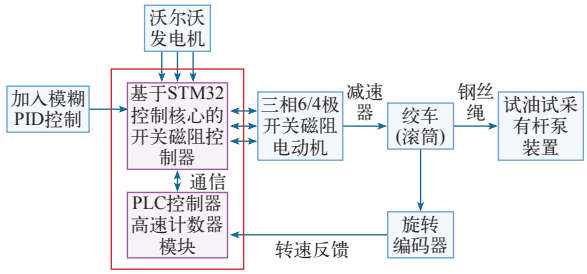


图2　车载试油试采举升装置电动机直驱总体结构框图

2　控制系统硬件设计

应用于车载试油试采举升装置的开关磁阻电动机控制系统主要包括SRM、主控系统、功率变换器、信号检测以及控制面板五部分[8-9]，开关磁阻电动机调速系统的总体结构框图如图3所示[10]。

以STM32F303为控制核心的主控系统作用如前所述，可以实现系统参数存储、计算以及信号控制；信号检测电路采集设备运行时的开关磁阻

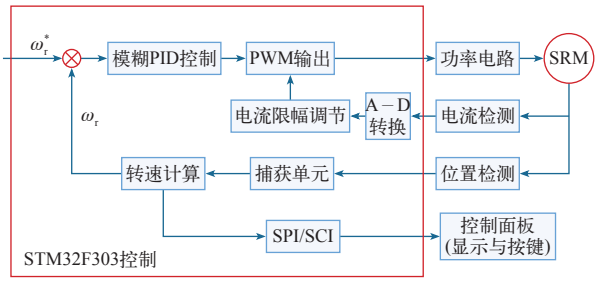


图3　开关磁阻电动机调速系统的总体框图

电动机电流、位置和温度信号，保护电动机可靠运行；控制面板通过SPI/SCI通信，在设置参数和故障分析时起到重要作用。

2.1　STM32单片机控制模块

STM32F303单片机是ST公司生产的采用新的基于ARM内核的32位MCU系列，其内核是ARM公司为要求高性能、低成本和低功耗的嵌入式应用专门设计的Cortex－M4内核（带有FPU和DSP指令），有12位DAC，超快速ADC12位，可管理高达三个FOC电动机控制，同时集成多种模拟外设，可满足电动机控制系统对于单片机数据处理、逻辑控制和数据通信等功能的需要[11-12]。

2.2　电动机驱动模块

本系统采用三相不对称半桥功率变换电路的拓扑结构，由6个FF150R12R74 IGBT和6个快速恢复二极管组成，IGBT的驱动元件为6个VLA517－01R驱动器。电动机驱动模块如图4所示。

单片机定时器输出三相PWM输出信号PWM－AU、PWM－AD、PWM－BU、PWM－BD、PWM－CU和PWM－CD，经电平转换元件CD40106反向整形后输出PA－UpFront、PA－DownFront、PB－UpFront、PB－DownFront、PC－UpFront和PC－DownFront，进而使信号进入逻辑综合电路。逻辑综合电路将三相PWM整形输出的信号和电流反馈信号经CD4081作“与”运算后，传递到输出驱动电路。经逻辑综合电路后输出的6路信号反向串联2 V稳压二极管进行稳压，防止功率变换电路IGBT驱动信号对主控系统的冲击。最后信号经ULN2003双列16脚封装的晶体管阵列电路进行信号放大，输出到STM32F303主控

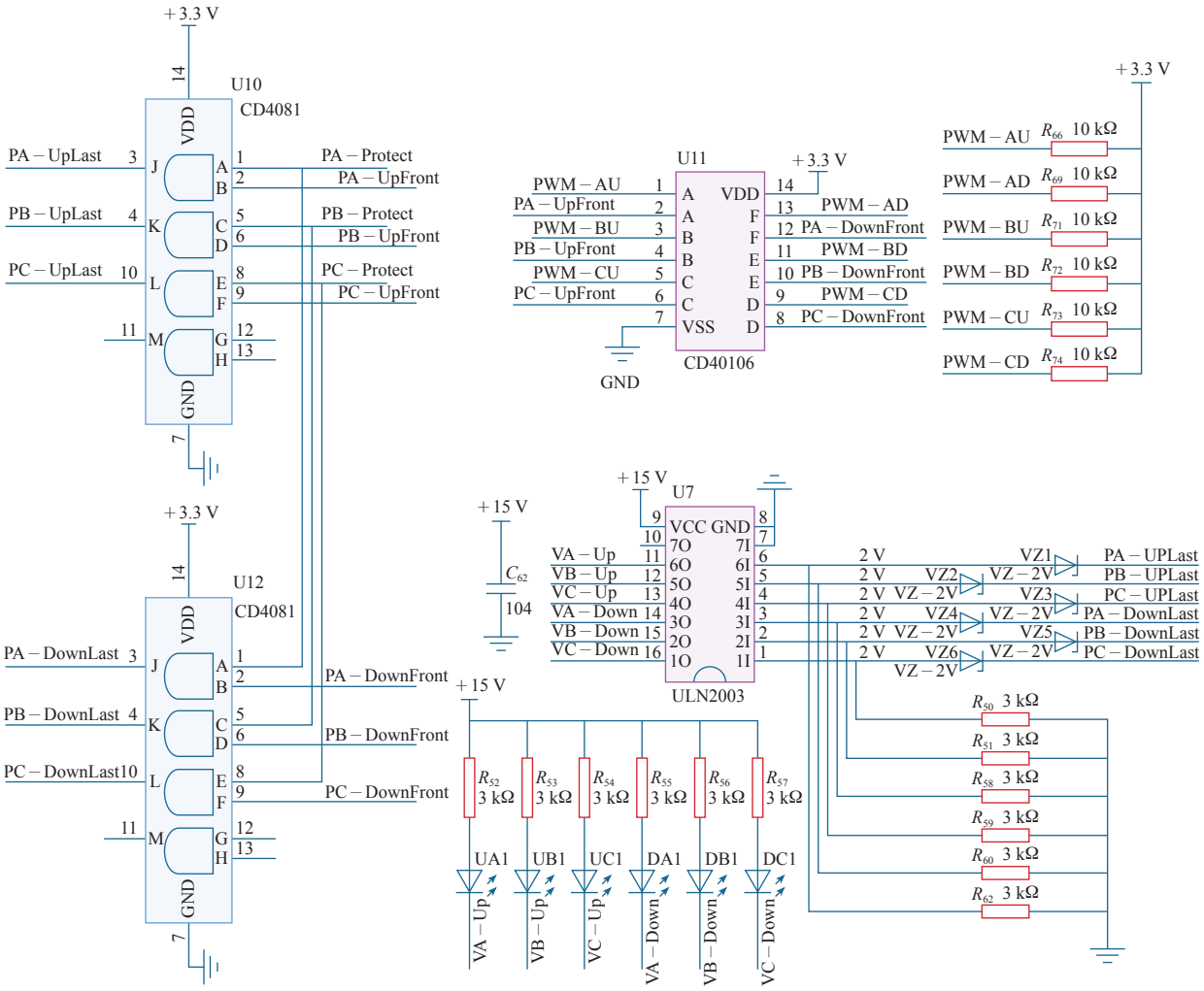


图4　电动机驱动模块

系统的外围接口，VA－Up作为A相上桥IGBT驱动信号，VA－Down作为A相下桥IGBT驱动信号，经VLA517－01R驱动器驱动IGBT导通或截止[13]。调节不对称半桥IGBT导通顺序，驱动电动机正反转，通过调节PWM占空比和开通角θ_{on}的大小，调整输入电动机端电压大小，进而实现速度闭环控制[14]。

2.3　转子位置检测电路

本文所用三相12/8极开关磁阻电动机采用3个光电传感器的全数检测方法，传感器彼此相隔30°，随着转子转动，光电传感器O、P、Q输出3个宽为90°、相位互差30°及占空比为50%的方波信号。信号先经过分压滤波器滤除干扰信号，然后位置信号经六相施密特触发器模块CD40106整形输出，而后经分压电路限幅和CD4049变换器变换，将＋15 V信号变换为＋5 V信号，并传入主控系统，经三相位置信号作“异或”运算，得到相绕组导通信号，以控制功率变换电路IGBT的导通。转子位置检测电路如图5所示。

2.4　电流检测电路

电流检测器（LEM模块）采集到三相绕组电流I_{SA}、I_{SB}和I_{SC}，经过电阻转化成STM32F303可以检测的电压信号，进而经过低压滤波电路滤除其中高频干扰信号。采用LM224的电压跟随器进行隔离，以防止后续信号对待检测电压信号的干扰，最后再经过一道滤波电路输入到STM32F303的ADC转换模块，完成对绕组电流的检测。其中电流检测电路如图6所示。

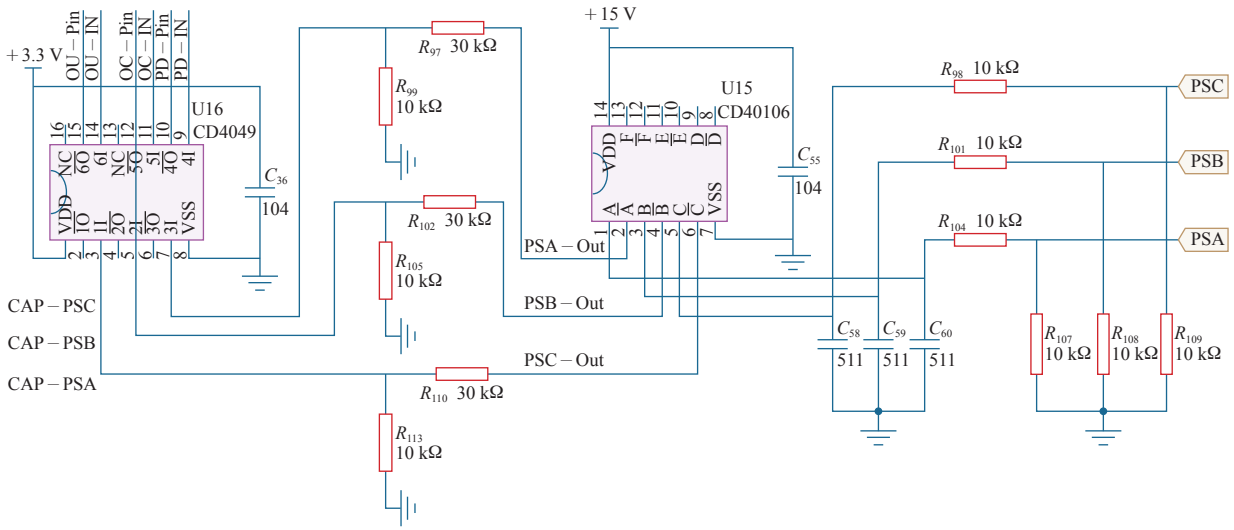


图5 转子位置检测电路

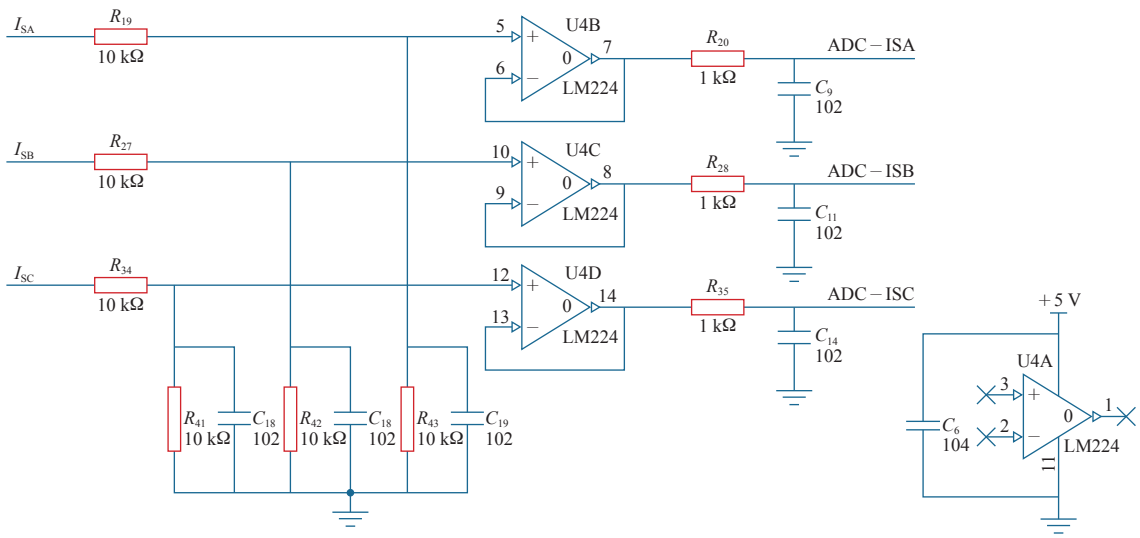


图6 电流采集检测电路

2.5 保护电路

本系统中硬件过电流保护电路如图7所示。以A相为例说明，其余两相结构功能和A相相同。首先将霍尔元件检测的电流转化成电压信号，并对其进行滤波，输入到比较器LM339的负端，与设定好的电压值进行比较，如果电路中出现过电流，则比较器输出保护信号到STM32F303，使电动机调节转速或停止运行。此为最大电流保护信号，实现对功率器件驱动电路的过电流保护。

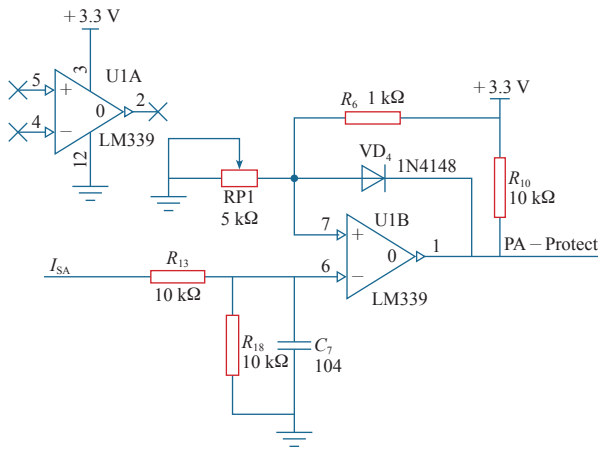
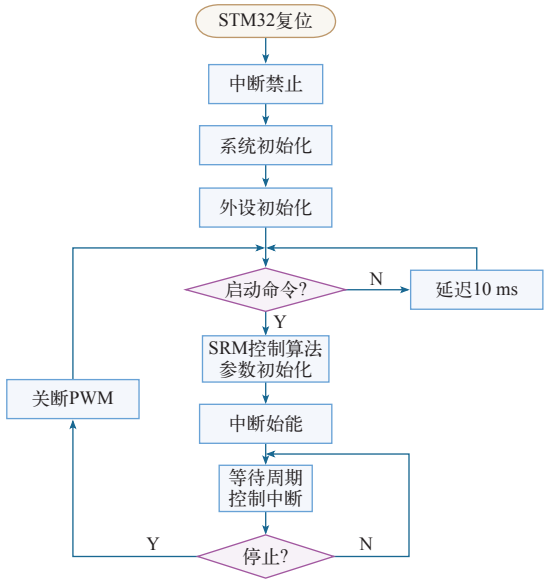


图7 硬件保护电路

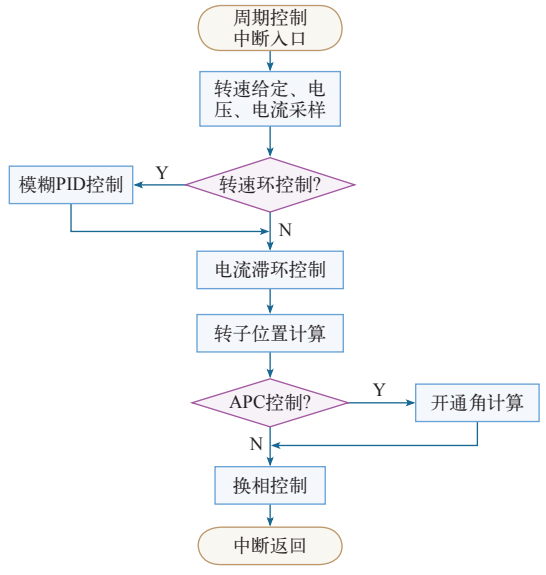
3 软件部分设计

控制系统软件部分采用C语言编写，仿真调试

集成环境为MDK5，根据电路功能图，系统程序主要由主程序、信号采集中断子程序、控制面板SPI数据传输程序以及控制程序主体组成。主程序包括系统初始化、外设初始化；调节器初始化主要包括模糊PI控制算法参数初始化、电动机参数初始化和位置复位标志初始化；中断子程序主要包括电压电流信号检测、转速控制、励磁电流控制和换相控制等。SRM控制软件主程序和中断程序流程如图8所示。



（a）SRM控制软件主程序流程



（b）SRM控制软件中断程序流程

图8　SRM控制软件流程

4　系统实验

4.1　控制系统硬件搭建

根据文献[1]对试油试采两种运行工况和平衡配重进行计算分析，本设计选用75 kW开关磁阻电动机作为系统的驱动电动机，额定转速选用1 000 r/min，起动转矩约为200%额定转矩，起动电流约为30%额定电流。电气控制柜中元件主要包括散热风机、断路器、避雷器、温度控制器、电能表、PLC、制动电阻和加热器等。其中PLC监控系统通过电气控制柜上的按钮接收试油试采的工作指令，根据接收到的控制命令可靠地执行开闭电动机，并控制电动机正反转调节系统的输出，准确控制有杆泵完成相应动作。开关磁阻电动机电气控制柜组装图如图9所示。

图9　电气控制柜组装图

4.2　系统实验调试

车载试油试采具有冲程和冲次可调功能，在调试运行时，将有杆泵的最大行程设置成$S=5$ m，冲次为$N=3$次/min，速度规划曲线采用梯形速度曲线，上下冲程时间都为$t_u=10$ s，加速度和减速度阶段的行程都为0.5 m。经数学计算分析得系统最大提升速度为$v=0.6$ m/s，$a=0.36$ m/s^2，$t_a=1.67$ s。设定好运行参数后，加入模糊PID后有杆泵的速度曲线和位移曲线如图10、图11所示。

从图中可以看出，速度曲线存在一定波动，

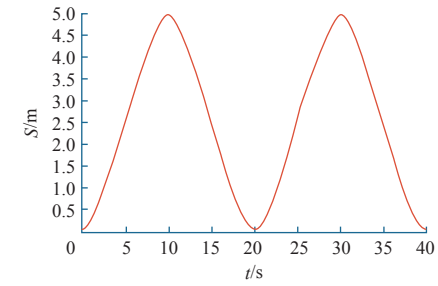


图10 模糊PID控制有杆泵位移曲线

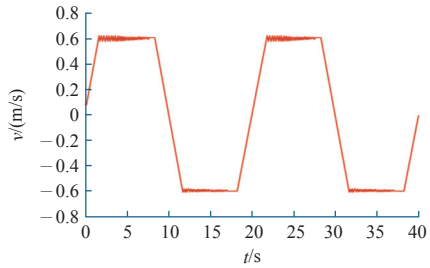


图11 模糊PID控制有杆泵速度曲线

这是由于开关磁阻电动机转矩脉动和钢丝绳形变引起的，但此波动在合理的误差范围内。同时有杆泵的运行速度可以较好地跟随电动机输出的转速，满足试油试采的运行工况。

4.3 现场测试情况

采用SRM的车载试油试采举升装置驱动控制系统在华北油田现场实验5井次。测试和实验结果表明，采用SRM的车载试油试采举升装置，能实现原柴油发动机装置的所有功能。主驱动系统和平衡配重系统运转正常，能根据井况随时对冲程和冲次进行无级调节。初步测试能耗降低约40%，试采效率提高约15%，设备运行成功率为100%。

5 结束语

1）所设计的采用SRM的车载试油试采举升装置驱动控制系统能满足试油试采运行工况的要求，并且加入模糊PID控制能使电动机在不需要知道准确数学模型的基础上，实现对电动机的准确控制，进而实现对有杆泵的有效控制。

2）利用开关磁阻电动机适用于频繁起停以及正反转的场合，对车载试油试采举升装置动力驱动系统进行节能改造，使得控制系统简单可靠，试油试采作业效率提升。

参考文献

[1] 刘超．移动式试油试采举升装置的设计研究 [D]．杭州：浙江大学，2015：1-5．

[2] 苏宏宇，马华丽，刘庆辉，等．利用试油试采资料进行区块产能评价 [C]．采油工程，2011，1 (2)：54-56．

[3] 魏新．移动式试油试采举升装置电液控制系统的设计研究 [D]．杭州：浙江大学，2008．

[4] 张彦廷，孙绪振，张恩强，等．液压抽油机关键参数分析及节能研究 [J]．机床与液压，2009，37 (10)：80-82．

[5] 中国石油集团西部钻探工程有限公司试油公司．试油工操作技能培训教材 [M]．北京：石油工业出版社，2012：265-275．

[6] 赵鹏宇，陈英龙，孙军，等．基于液压平衡的试油试采系统建模与仿真 [J]．浙江大学学报：工学版，2016，50 (4)：651-653．

[7] 范文明，宋锦春．新型节能液压抽油驱动系统设计 [J]．机械设计与制造，2014 (7)：68-71．

[8] 王宏华．开关磁阻电动机调速控制技术 [M]．北京：机械工业出版社，2014：237-248．

[9] 吴红星．开关磁阻电机系统理论与控制技术 [M]．北京：中国电力出版社，2010．

[10] 周彦涛，卜庆华，董健，等．基于ARM的开关磁阻电机控制系统实验研究 [J]．微电机，2010，43 (8)：61-63．

[11] 钟锐，徐宇拓，陆生礼．基于Cortex M3处理器的开关磁阻电机控制器设计 [J]．电子技术应用，2011，37 (3)：32-34．

[12] 谈宏兴，施火泉，朱发旺，等．基于STM32的开关磁阻电机控制器的设计 [J]．江南大学学报：自然科学版，2014，13 (3)：313-316．

[13] 孟润泉，王振民，许春雨．新型开关磁阻电机驱动系统软开关功率变换器原理分析与仿真 [J]．煤炭学报，2009，34 (11)：1564-1566．

[14] 董亮，王艳，李彩虹．一种小功率开关磁阻电机驱动系统设计 [J]．微电机，2009，42 (3)：56-60．

（收稿日期：2018－07－06）EA