

比例电磁阀变频率 PWM 驱动方法

康健 尚沙沙 焦文学 王杏 浦定超 钮震 叶其团 汪春晖

三一重机小型挖掘机研究院, 昆山, 215334

摘要:在挖掘机等工程机械中使用的嵌入式控制器普遍利用脉冲宽度调制(PWM)来驱动比例电磁阀。但由于 PWM 脉冲输出的特点和电磁阀自身电感特性的双重制约,使 PWM 驱动的比例电磁阀性能难以充分发挥,甚至会影响控制系统整体稳定性。因此,一种根据不同占空比改变 PWM 频率的方法被用于驱动比例电磁阀。控制器根据电磁阀控制需求的不同占空比,输出不同频率的 PWM。测试结果表明,使用变频率 PWM 驱动比例电磁阀的方法可以在保证比例电磁阀二次压力稳定的前提下,维持自身的小幅震荡,同时降低比例电磁阀的功率损耗。

关键词:比例电磁阀;脉冲宽度调制;挖掘机;电控泵

中图分类号:TP271

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2015.08.007

Proportional Electromagnetic Valve Driven by Frequency-varying PWM

Kang Jian Shang Shasha Jiao Wenxue Wang Xing

Pu Dingchao Niu Zhen Ye Qituan Wang Chunhui

Small Size Excavator R&D institute of SANY Heavy Machine, Kunshan, Jiangsu, 215334

Abstract: In applications of excavator or other industrial machines, proportional electromagnetic valve was usually driven by PWM signals of embedded control system. However, due to pulse output characteristics of electromagnet, the performance of proportional electromagnetic valve was limited, even impacted stability of the system. A frequency-varying method of PWM driving was proposed. According to different duty ratio of PWM, the embedded control system output PWM with different frequencies. Through this method, the output oil pressure of proportional electromagnetic valve maintains within a determined range, the valve-core's zero-average oscillations is reserved and power consumption of proportional electromagnetic valve is relatively low.

Key words: proportional electromagnetic valve; pulse width modulation (PWM); excavator; electronic control pump

0 引言

在工程机械应用中,电磁阀已经成为最重要的电-机械转换器。初期的电磁阀使用通断型电磁铁,仅存在开和关两种状态,响应频率也相对较低。为适应大型机电一体化系统精确控制的要求,可以在两个极限位置之间保持任意开度大小的比例电磁阀被大量应用。比例电磁阀与开关电磁阀的区别主要在磁极和支撑系统^[1]。开关电磁阀吸合时气隙变小,依靠不同极性磁极之间的吸力吸合;比例电磁阀工作时气隙与衔铁的运动方向垂直,通过控制磁极的磁饱和程度来控制衔铁位置。

工程机械的嵌入式控制系统通常利用脉冲宽度调制(PWM)的方法来驱动比例电磁阀。PWM 包含占空比和频率两种信息;调整占空比可以得到所需电压值;而 PWM 频率的选择对电磁阀二次压力的稳定性和自身功耗有很大影响。如果频率过低,电磁阀衔铁将会跟随 PWM 波形大幅振动;如果频率过高,具有电感特性的电磁阀将

PWM 整流为过于稳定的驱动信号,过大的静摩擦力将会影响比例电磁阀的控制精度和动态性能;PWM 频率过大还会导致电磁线圈的铁损过高。理想的比例电磁阀 PWM 驱动方法需要使阀芯保持一定振幅的同时可以输出稳定的二次压力^[2]。

三一重机 SY135 挖掘机配置的 KPM 半电控泵 K3V 和全电控泵 K7V 分别使用比例电磁阀来控制双泵总功率和调整双泵排量。作为整机控制的关键元件,实现电磁阀的有效控制将在很大程度上影响系统的稳定性^[3-5];同时,比例电磁阀的频响特性和负载能力也会影响挖掘机快速响应的能力。为提升比例电磁阀输出压力的稳定性并降低能耗,一种根据占空比变化改变 PWM 频率的方法被用于比例电磁阀驱动。根据比例电磁阀控制所需占空比的不同采用不同的 PWM 频率,使比例电磁阀达到输出压力稳定、防止阀芯卡滞和降低功耗的目的。为了便于测试,本文设计了基于 STM32 单片机的电磁阀控制器,能够根据不同占空比输出不同频率的 PWM。

收稿日期:2014-03-19

1 比例电磁阀控制特性分析

KPM-K3V 系列电控泵利用比例电磁阀来控制泵的总功率,而 K7V 系列全电控泵的双泵控制完全依靠比例电磁阀进行排量的调节,比例电磁阀自身的动态特性对电液控制系统的健壮性有很大影响,因此比例电磁阀成为机电液一体化控制中的关键器件。为便于分析,比例电磁阀的电气控制回路可以简化为电阻和电感的串联,而机械控制部分则可以表示为衔铁质量块、气隙阻尼和回位弹簧的二阶振荡系统,并且其电气系统和机械系统互相耦合。

1.1 功率损耗

电磁阀在工作中会产生各种形式的功率损耗,主要包括铜损和铁损两方面。其中,铜损($\Delta P_{Cu} = I^2 r$)是指电流通过电磁铁线圈发热而损失的功率^[6],而铁损($\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_e$)包括磁滞损耗和涡流损耗^[7]。磁滞损耗为铁磁材料在反复磁化过程中消耗的功率。磁滞损耗 ΔP_h 正比于交变磁化的频率 f 、铁心的体积 V 和迟滞回线所包围的面积,其大小与铁磁材料的性质 σ_h 、磁化频率和磁感应强度的最大值 B_m 有关。计算磁滞损耗的经验公式为

$$\Delta P_h = \sigma_h f B_m^n V \quad (1)$$

其中,指数 n 与 B_m 有关。

由于电磁铁的闭合铁芯处于交变磁场中,交变的磁通量使闭合铁芯中产生感应电流(即涡电流),由涡电流产生的铁损部分称为涡流损耗。对于特定的比例电磁阀,涡流损耗与交变磁化的频率 f 以及磁感应强度的最大值 B_m 的二次方成正比,其经验公式为

$$\Delta P_e = \sigma_e f^2 B_m^2 V \quad (2)$$

式中, σ_e 为与电磁阀铁芯材料和结构有关的常数。

由上可知:驱动比例电磁阀的 PWM 信号频率过高将会导致过多的功率损失,增加电磁阀的磁滞损耗和涡流损耗。在保证比例电磁阀二次压力稳定的前提下,PWM 频率应尽可能地低。

1.2 机械系统传递函数

比例电磁阀由衔铁弹簧组成的机械系统的传递函数为

$$\frac{X(s)}{\Delta F(s)} = \frac{1/K}{s^2/\omega_m^2 + 2\delta_m s/\omega_m + 1} \quad (3)$$

其中, ω_m 表示衔铁弹簧组成的二阶振荡系统的谐振频率; δ_m 表示衔铁弹簧系统的阻尼比,该系数与液压油的温度有关,随着温度的升高,液压油黏度变小会使振动阻尼变小; K 为电磁阀弹簧刚度。比例电磁铁位置控制普遍采用电流负反馈,

同时电磁阀内部衔铁质量的减小和弹簧刚度的不断提高使得比例电磁铁的动态响应速度得到提升。

1.3 电气系统动态性能

比例电磁阀电气回路的动态性能可以表示为以下微分方程式:

$$U(t) = Ri(t) + L_e di(t)/dt + K_v dx(t)/dt \quad (4)$$

式中, $U(t)$ 为线圈电压; R 为线圈电阻; $i(t)$ 为线圈实时电流; $x(t)$ 为衔铁位移; K_v 为速度反电势系数; L_e 为线圈电感; t 为时间。

嵌入式控制器等数字电路普遍采用 PWM 来驱动比例电磁阀。由于 PWM 等效为高频开关信号,电磁阀线圈在一个控制周期内的实时电流为^[8]

$$i(t) = \begin{cases} U/R + (I - dI - U/R)e^{-t/\tau} & 0 < t < DT \\ (I + dI)e^{-t/(DT\tau)} & DT < t < T \end{cases} \quad (5)$$

式中, D 为占空比; T 为 PWM 周期。

由上可知,采用 PWM 驱动比例电磁阀时,线圈中的稳态电流 I 和电流波动 dI 取决于线圈的时间常数 τ 、PWM 频率 $1/T$ 和占空比 D 。根据瞬态电流可以推导出电流及其波动大小:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{U}{2R} \frac{(1-A)(1+B)}{1-AB} \\ dI &= \frac{U}{2R} \frac{(1-A)(1-B)}{1-AB} \\ A &= e^{-DT/\tau} \quad B = e^{-(1-D)T/\tau} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据式(6),在控制系统中 I 作为驱动电流控制电磁阀二次压力。电流波动 dI 可以保持衔铁自身的小幅振动,防止出现阀芯卡滞的现象。如果 PWM 频率过低,会引起比例电磁阀二次压力随 PWM 脉冲波动。同样,PWM 驱动电磁阀采用不同占空比也会对驱动电流的波动情况产生影响。KPM 公司 K3V 半电控泵的比例电磁阀内部电阻 R 为 17.5Ω ,线圈电感 L_e 为 19.5 mH ,则该电磁阀线圈的时间常数 $\tau = L_e/R = 1.1143 \text{ ms}$,挖掘机电压为 24 V 。不同占空比条件下线圈电流波动大小 dI 和电流值 I 变化如图 1 所示。

1.4 比例电磁阀控制策略

比例电磁铁属于励磁式电-机械转换器件,嵌入式控制器产生的控制电流在比例电磁铁线圈中产生磁通,推动衔铁位移,阀芯受到的电磁力具有与电流波动相同的频率。综合考虑比例电磁阀的机电液系统,其机械部分传递函数为低通二阶滤波,而电气系统传递函数为低通一阶滤波。

KPM-K3V 电控泵配置的比例电磁阀的振荡频率为 80 Hz 。由二阶低通滤波器的 Bode 图可知,对于频率大于 80 Hz 的电流波动,电磁阀的机械系统将进行抑制。并且电流的频率越高,机械二阶振

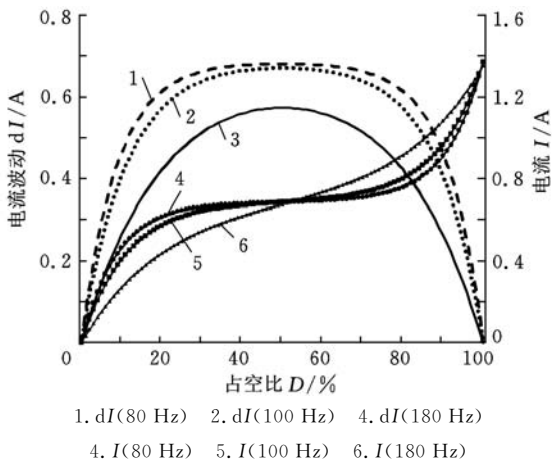


图 1 不同 PWM 占空比、不同频率时电磁阀线圈电流

荡系统的抑制作用越强。电磁阀的电气系统相当于一阶的低通滤波,由其时间常数可知,电气系统的截止频率为 897 Hz,相对于机械系统,电气系统对 PWM 脉冲波动信号的抑制作用较小。因此,可以利用机械系统的滤波特性对 PWM 信号进行过滤得到所需的稳定的驱动电流,但同时需保留阀芯自身颤振所需的小幅电流波动。

电磁阀阀芯的振动幅度不仅与 PWM 频率有关,而且根据图 1 还可以发现,在某一固定的 PWM 频率下电磁阀输出的二次压力在占空比为 50% 时波动最为剧烈,而在占空比为 10% 和 90% 的情况下二次压力输出波动较小。因此,本文提出了一种根据不同占空比改变 PWM 信号频率的

控制方法:为了降低电磁阀的功率损失在占空比为 10% 和 90% 附近时 PWM 输出,采用较低的 PWM 频率,而当占空比在 50% 附近时 PWM 输出采用较高的频率。

2 比例电磁阀驱动器设计

为对驱动比例电磁阀的 PWM 频率大小进行优化,设计了基于 STM32F103C8T6 微处理器的比例电磁阀控制系统^[9-11]。STM32 为意法半导体集团推出的基于 ARM 构架的 32 位低功耗微处理器;具有 20K 的片内 SRAM 和 64K 的 FLASH 程序存储器;主频达到了 72 MHz,满足比例电磁阀 PID 控制的计算要求;4 个通用定时器 TIM_x 可以复用到 GPIO 口分别输出 4 个通道的 PWM 驱动信号;支持 16 通道的 12 位 ADC。

为了使 STM32 芯片端口 3.3 V 的输出电压驱动比例电磁阀,采用 L298N 芯片实现功率放大,控制挖掘机的 24 V 电源驱动比例电磁阀;使用 1 Ω 精密电阻作为电流采样元件实现电流反馈;采样电阻与比例电磁阀线圈串联,采样电阻两端电压利用 NE5532 双通道运算放大器得到电压差并输入微处理器中复用为 ADC 功能的 GPIO 口;STM32 芯片与挖掘机原控制器之间通过 TJA1050 总线驱动芯片进行 CAN 通信。利用以上各芯片设计的比例电磁阀控制器的电气原理如图 2 所示。

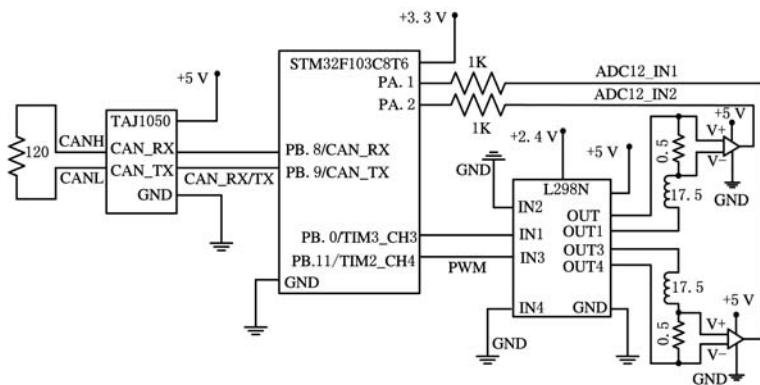


图 2 挖掘机双泵比例电磁阀控制器电路图

3 二次压力测试

当挖掘机在不同挡位即发动机在不同转速工作时,液压泵需要根据发动机的外特性转速扭矩曲线进行功率匹配,即用于液压泵的恒功率控制的比例电磁阀需要根据不同的工作挡位输入不同的工作电流。基于以上要求,比例电磁阀在不同挡位二次压力的测试方法如下:设定电磁阀 PWM 驱动的频率后,每隔一段时间变换发动机

挡位,这时控制器将根据预先设定的功率匹配结果和工作挡位输出不同的电流值。数据采集使用 FLUKE 196C 示波器配备的电流钳测量电流大小,并且使用 Parker Service Master 获取比例电磁阀出口处的二次压力大小和温度值。

液压油温度变化而导致的液压油黏度变化会影响电磁阀的响应特性。为忽略这一影响因素,分别在液压油温度为环境温度和完全热机后进行二次压力测试。在电流恒定条件下,液压油温度

为 13.5 °C 时采用不同 PWM 频率驱动比例电磁阀的二次压力测试结果如图 3 所示。完全热机后

当液压油温度达到 36 °C 时,二次压力波动相对较大,如图 4 所示。

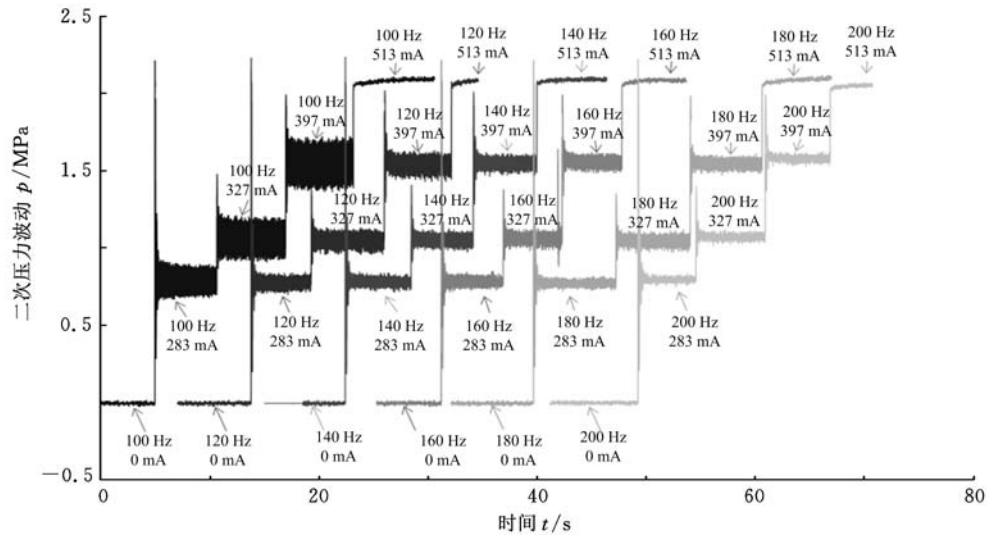


图 3 13.5 °C 时不同 PWM 频率比例电磁阀输出压力波动

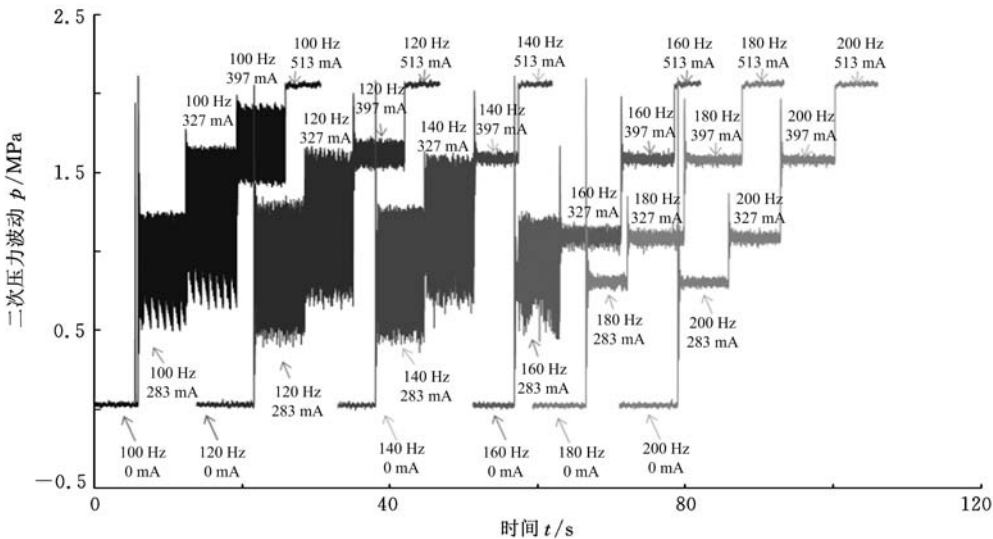


图 4 36 °C 时不同 PWM 频率比例电磁阀输出压力波动

针对本测试采用寄生颤振 PWM 的比例电磁阀驱动器,当温度较低时电磁阀的二次压力波动范围相对较小,并且 PWM 频率提高时,电磁阀输出的二次压力波动相应减小。同时驱动电流的不同也会导致二次压力波动范围变化。根据测试结果,采用不同频率 PWM 且电流为 327 mA 时,电磁阀输出压力波动较大;而当电流逐渐远离 327 mA 时,压力波动范围随之逐渐减小;当电流为 0 或 513 mA 时,由于接近比例电磁阀能够输出的最大二次压力和最小二次压力,压力波动始终保持较低水平。

根据上述分析,当二次压力波动满足要求时应该采用更低的 PWM 驱动频率。根据控制系统稳定性要求,选择波动范围相近且频率相对较低的 PWM 频率为该输出电流的最优频率。因此,

可以得到不同温度条件下的比例电磁阀变频率 PWM 驱动策略,如表 1 所示。可知当电流值为最大值和最小值时,要达到二次压力稳定的 PWM 频率较低;而当电流处于中位时,需要采用较高的频率,与理论分析的结果一致。如果采用其他驱动电流时,通过线性插值可以得到该电流值条件下的优化 PWM 频率。

表 1 比例电磁阀 PWM 优化频率

电流 (mA)	13.5 °C 时优化频率 (Hz)	36 °C 时优化频率 (Hz)
0	100	100
283	120	140
327	140	200
397	140	180
513	100	100

当挖掘机散热条件不好或环境温度较高时,液压油温度存在大幅度变化甚至可以达到 70~80 °C。根据测试结果,设置频率为 300 Hz 能够

在高温且液压油温存在大幅变化时得到稳定的二次压力。并且在挖掘机工作 90 min 后,泵控制比例电磁阀阀体表面温度为 53 °C,液压泵表面温度为 60 °C,控制器表面温度为 26 °C,均符合正常工作要求。

4 结论

(1)根据 PWM 占空比即电流的不同,得到寄生颤振 PWM 驱动比例电磁阀的最优频率。通过对比例电磁阀输出压力的测试结果表明:利用变频率的 PWM 驱动信号可以保证在 PWM 频率较低的前提下,使电磁阀输出稳定的二次压力;同时电磁阀的功率损耗较低,且保留了电磁阀阀芯的小幅颤振来防止阀芯卡滞。

(2)随着液压油温度的升高,同样频率 PWM 驱动的比例电磁阀输出的二次压力逐渐变不稳定。针对采用固定频率的电磁阀驱动系统,高温条件下可采用 300 Hz 的 PWM 来驱动比例电磁阀。

参考文献:

- [1] 王晓罡,陈文曲,唐妹芳,等. 比例电磁阀的特性分析与试验研究[J]. 火箭推进, 2011, 37(2): 52-59.
Wang Xiaogang, Chen Wenqu, Tang Meifang, et al. Testing and Characteristics Analysis of Proportional Solenoid Valve[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(2): 52-59.
- [2] 苏岭,柳泉冰,汪映,等. 脉宽调制保持电磁阀驱动参数的研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(7): 689-692.
Su Ling, Liu Quanbing, Wang Ying, et al. Experimental Investigation on Parameters of Pulse Width Modulation Holding Solenoid Valve Drive Mode[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(7): 689-692.
- [3] 刘兴华,王裕鹏,陈宇航,等. 电磁阀驱动电流对喷油特性影响规律研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(5): 514-518.
Liu Xinghua, Wang Yupeng, Chen Yuhang, et al. Effects of Solenoid Valve Drive Current on Fuel Injection Characteristics[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(5): 514-518.
- [4] 叶宏伟,王涛,金鑫. 高速电磁阀驱动控制策略的研究[J]. 电工电气, 2011(7): 18-20.
Ye Hongwei, Wang Tao, Jin Xin. Study on High Speed Solenoid Valve Drive Control Strategy[J]. Diangong Dianqi, 2011(7): 18-20.
- [5] 刘建成,王立德,刘彪. 基于 DSP 的柴油机喷油电磁

阀驱动电路的设计[J]. 内燃机, 2007(1): 14-17.

- Liu Jiancheng, Wang Lide, Liu Biao. Design of Driving Circuit for Oil Injection Solenoid Based on DSP[J]. Internal Combustion Engines, 2007(1): 14-17.
- [6] 席建中,张宁,韩成春. 电磁阀线圈温度预测建模及耐温性判断[J]. 控制工程, 2013, 20(2): 377-380.
Xi Jianzhong, Zhang Ning, Han Chengchun. Coil Temperature Prediction Modeling of Electromagnetic Control Valve and Resistant Temperature Judgment[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(2): 377-380.
- [7] 姚晓武. 汽车燃油系统比例电磁阀关键技术的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
- [8] 段丽娟,陶刚,孟飞. 高速比例电磁阀电-机械转换器动态特性研究[J]. 液压与气动, 2013(5): 20-22.
Duan Lijuan, Tao Gang, Meng Fei. Electro-mechanical Converter Dynamic Analysis of High-speed Proportional Solenoid Valve[J]. Chinese Hydraulics Pneumatics, 2013(5): 20-22.
- [9] 翁寅生. 基于 STM32 的电磁阀控制电路研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(4): 89-92.
Weng Yinsheng. Study on Solenoid Valve Control Circuit Based on STM32[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(4): 89-92.
- [10] 袁月峰,刘钢海,陈典红. 基于 STM32 单片机的气动比例方向阀控制器[J]. 仪表技术与传感器, 2013(4): 22-27.
Yuan Yuefeng, Liu Ganghai, Chen Dianhong. Digital Controller for Pneumatic Proportional Directional Valve Based on STM32 Microcontroller[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(4): 22-27.
- [11] 卢军,李振璧,曹明明,等. 基于 STM32 的掘进机控制系统设计[J]. 煤矿机械, 2013, 34(1): 265-267.
Lu Jun, Li Zhenbi, Cao Mingming, et al. Design of Control System of Boring Machine Based on STM32[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(1): 265-267.

(编辑 陈勇)

作者简介:康健,男,1985年生。三一重机小型挖掘机研究院工程师、博士。主要研究方向为工程机械发动机液压泵控制。发表论文 2 篇。尚沙沙,女,1984年生。三一重机小型挖掘机研究院工程师。焦文学,男,1984年生。三一重机小型挖掘机研究院工程师。王杏,女,1984年生。三一重机小型挖掘机研究院工程师。浦定超,男,1985年生。三一重机小型挖掘机研究院工程师。钮震,男,1985年生。三一重机小型挖掘机研究院工程师。叶共团,男,1982年生。三一重机小型挖掘机研究院工程师。汪春晖,男,1966年生。三一重机小型挖掘机研究院院长、工程师。