

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.09.047

# V/F 控制模式下恒压泵动力源特性研究

闫政

(晋中学院机械系, 晋中 030619)

**摘要:** 为使液动力源在负载多变条件下降低能耗提高效率,实现灵活多变的输出流量、压力和功率控制,提出采用变频 V/F 控制模式下,控制三相异步电机,驱动恒压泵作为液动力源,实现压力、流量和功率复合控制的高能效液动力源。针对变频启动慢的问题,在主回路上并联可控蓄能器,采用蓄能器辅助启动。确立了恒压泵、变频器、电机各部分的计算模型以及 AMESim 软件下的仿真模型和试验原理。进行了动力源压力恒压特性仿真与试验,结果表明恒压仿真模型较准确。P-Q 试验表明,利用先导压力阀控制压力动态响应时间不超 0.2 s,超调不高于 15%;流量动态特性差,利用蓄能器辅助启动,带载 8 MPa 转速达到 1 500 r/min,启动时间不超 0.2 s。功率试验结果表明,高压小流量和非工作周期压力卸荷工况,电机转速由 1 500 r/min 降至 450 r/min,电机功率分别降低 70.3% 和 64.8%;恒压模式下大排量、低转速可以使该试验系统能耗降低约 3.8 kW。

**关键词:** 恒压泵; 变频控制; 液动力源

中图分类号: TH3      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2022)09-0451-08      OSID: 

## Dynamic Characteristics of Electro-hydraulic Power Source of Constant Pressure Pump under V/F Control Mode

YAN Zheng

(Department of Mechanical, Jinzhong University, Jinzhong 030619, China)

**Abstract:** To reduce the energy consumption and improve the energy utilization efficiency of the hydraulic power source system under the condition of changing loads, it can realize flexible and changeable output flow, pressure and power control. A three-phase asynchronous motor was controlled under the variable frequency V/F control mode, a constant pressure pump was driven as a hydraulic power source. It was a high-energy electro-hydraulic power source that realized the compound control of pressure, flow and power. In view of the slow start of frequency conversion, a controllable accumulator was connected in parallel with the main circuit to solve the problem of slow start-up characteristics of an AC asynchronous motor. Firstly, the mathematical models of constant pressure pump, frequency converter and motor were established by using mechanical equations. Secondly, the system simulation model was established by AMESim software on this basis. And a test system platform was built, through the test, the constant pressure characteristic simulation was consistent with the test, confirming that the simulation model was accurate. The pressure and flow characteristics of the power source of the constant pressure pump driven by the variable frequency asynchronous motor were further simulated and tested. The accuracy of the simulation model was verified by comparing the pressure characteristic test with the simulation model. Finally, the simulation model was used to find the parameters of the auxiliary control switch accumulator, and three sets of data were determined for simulation analysis and P-Q and energy consumption tests. The P-Q test showed that the dynamic response time of the pressure controlled by the pilot pressure valve was not more than 0.2 s, and the overshoot was not more than 15%; the dynamic characteristics of the flow were poor, and the accumulator was used to assist the start. The time did not exceed 0.2 s. The energy consumption test showed that under the condition of high pressure and small flow and non-duty cycle pressure unloading, the motor speed was reduced from 1 500 r/min to 450 r/min, and the motor power was reduced by 70.3% and 64.8%, respectively. The low speed can reduce the energy consumption of the test system by about 3.8 kW.

**Key words:** constant pressure pump; variable frequency control; hydraulic power unit

0 引言

液动力源具有高效、流量变化范围大,控制方式多变等特点<sup>[1-3]</sup>,广泛应用在工程机械、矿山设备、军工航天等领域<sup>[4-5]</sup>。电液动力源由原来定转速驱动定量泵发展到变排量液压泵,通过控制阀实现了恒定压力、恒定流量、恒定功率的输出,在工作周期大大降低了噪声,提高了能效。为此,有学者通过改变配流盘卸荷槽结构,设计新的卸荷槽降低脉动,提高泵的动态响应<sup>[6-12]</sup>,也有建立斜盘动态数学模型分析变量泵动态特性<sup>[13-14]</sup>,该控制模式下虽降低了系统能耗,实现了压力、流量和功率的复合控制,但所有研究只在变量泵部分。在工作过程中,无论执行机构是否处于运行状态,电机一直处于额定转速下运行,能耗大,噪声大。

通过降低驱动定量泵转速达到节能降噪<sup>[15-16]</sup>,也有变频控制电机和变量泵组合实现流量、压力控制<sup>[17-18]</sup>,变频驱动的变量泵控制压力存在滞后,带载启动动态特性差。随着伺服电机的快速发展,通过伺服电机与定量泵、变量泵组合实现流量、压力和功率的控制是新的发展趋势<sup>[19-23]</sup>,但变转速控制不能解决低流量、高压条件下的节能降噪,同时伺服电机控制存在性价较低、只能适用于功率较小的系统和对压力控制采用积分闭环控制存在系统运行不稳定的问题<sup>[24-26]</sup>。

利用变量泵控制阀实现了压力、流量和功率的复合控制,但恒定转速存在非工作周期能耗大的问题。变速异步电机驱动存在压力控制滞后带载启动动态特性差;伺服电机驱动存在积分控制压力不稳定、性价比低,变速驱动也未对恒压模式和非工作周期的能效开展研究。本文提出采用变频 V/F 控制模式,变频器驱动异步交流电机提供恒压泵的动力,设计电液动力源,利用恒压泵解决压力控制滞后不稳定的问题,利用流量反馈变频控制转速实现流量控制,同时对压力和流量控制实现功率控制,对带载启动滞后问题采用蓄能器辅助启动,同时对非工作周期和高压小流量下工况开展试验。

1 动力源工作原理与仿真模型

1.1 工作原理

变频器压频比(V/F 控制模式)为额定电压和额定频率的比,设定基准电压为 380 V,基准频率为 50 Hz,在预置启动模式下,可以充分利用低功率大转矩的机械特性实现驱动控制和电机带载启动。变频器设置为 V/F 控制模式,将液压系统的压力和流量信号转换为电压信号,设置为控制器输入参数,初

始信号直接转换为电压信号对变频器的频率进行控制,实现以设定的转速驱动电机。

V/F 控制模式下变转速驱动恒压泵系统主要由变频器、三相异步交流电机、恒压泵、压力先导阀、蓄能器、dSPACE 硬件及软件部分、压力流量传感器、功率仪等组成,工作原理如图 1 所示。负载压力低于恒压泵压力先导阀设定压力时,恒压泵全排量输出流量;当负载压力达到设定压力时,斜盘会随着负载流量需求进行摆动调节排量,满足负载需求。蓄能器主要作用系统在启动过程中补偿泵供油不足所需流量,提供大扭矩反拖电机实现快速启动。驱动转速由变频异步电机控制,满足负载所需压力、流量。在 V/F 控制模式下,当负载压力达到设定恒压泵压力时,此时处于恒压模式工作,通过驱动转速和排量两个变量乘积决定流量的变化。如果恒压模式无法满足负载功率要求时,驱动转速降低保护液压系统过载。当处于非工作模式时驱动电机设定最低转速降低额外功耗。如果工况需要突然进入工作模式,通过蓄能器辅助液压泵驱动实现快速启动。

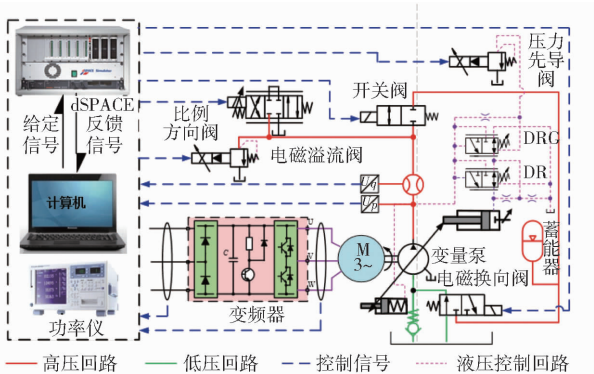


图 1 V/F 控制模式下恒压泵工作原理图

Fig. 1 Operating principle diagram of constant pressure pump under V/F control mode

1.2 电机及变频器组成的数学模型

变频器驱动三相交流电机的电机定子侧电压  $u_1$  和电流频率  $f_1$ 。变频器的控制电压  $u_f$  到恒压泵转速的转换过程为:信号电压  $u_f$  为 0 ~ 1 V,对应的变频器输出频率  $f_1$  为 0 ~ 50 Hz,电机对应转速  $n_p$  为 0 ~ 1 500 r/min。

控制电压和频率关系可表示为

$$f_1 = K_u u_f \tag{1}$$

电机转速和频率关系可表示为

$$n_p = K_n f_1 \tag{2}$$

异步电机电磁转矩公式为

$$T_n = \frac{3m_p}{2\pi R_2'} K_f u_1 - \frac{m_p^2}{40\pi R_2'} K_f^2 n_p = K_1 u_1 - K_2 n_p \tag{3}$$

电机轴转矩平衡公式为

$$\frac{dn_p}{dt} = (T_n - T_{LT} - K_3 n_p) K_4 \tag{4}$$

电机负载转矩公式为

$$T_{LT} = \frac{D_p p_d}{\eta_{pm}} = K_5 p_d \tag{5}$$

式中  $K_u$ ——变频器增益系数  
 $K_p$ ——频率变转速增益系数  
 $m_p$ ——电机的磁极对数  
 $R'_2$ ——折算后每相电阻  
 $u_1$ ——异步电机相电压  
 $K_f$ ——频率电压转换系数  
 $n_p$ ——电机实际转速  
 $D_p$ ——泵排量  
 $p_d$ ——泵出口压力  
 $\eta_{pm}$ ——泵机械效率  
 $t$ ——时间  
 $K_1、K_2、K_3、K_4、K_5$ ——对应等效系数

1.3 压力先导阀数学模型

电液动力源恒转速驱动下,恒压泵输出流量由排量变化去实现。通过高压油流过压力先导阀,流入控制活塞腔与反馈活塞腔、两腔压力差与弹簧建立动力学平衡方程,实现排量的改变,恒压功能压力取决于压力先导阀压力。利用压力先导阀的电磁力对阀芯进行控制,实现先导控制压力的设定。对于压力先导阀模型的建立,磁滞回线对控制影响较大。

磁滞回线特性方程为

$$H_{ed} = \frac{\sigma d^2}{12} \frac{dB}{dt} \tag{6}$$

$$H_{ex} = \sqrt{0.1375\sigma G V_0} \left| \frac{dB}{dt} \right|^{0.5} \tag{7}$$

式中  $H_{ed}$ ——涡流磁场强度  
 $H_{ex}$ ——剩余损耗磁场强度  
 $\sigma$ ——材料导电率  
 $B$ ——磁感应强度  
 $d$ ——叠后厚度  
 $G$ ——材料横截面积  
 $V_0$ ——磁场分布统计参数

压力先导阀动力学平衡方程为

$$p_c - p_d A_h + F = m \frac{d^2 y_1}{dt^2} + B_c \frac{dy_1}{dt} + K_s y_1 \tag{8}$$

式中  $y_1$ ——变量活塞位移  
 $p_c$ ——控制活塞腔压力  
 $A_h$ ——反馈活塞面积  
 $B_c$ ——阻尼系数  
 $m$ ——活塞和负载总质量

$K_s$ ——弹簧负载刚度  
 $F$ ——变量机构负载力

1.4 变量机构数学模型

变量泵通过斜盘两边控制活塞和反馈活塞建立力矩平衡方程,实现变量机构旋转达到变量需求。反馈活塞缸内安装压缩弹簧,在压力先导阀没有和控制活塞连通时,泵处于最大排量。当负载压力达到压力先导阀给定压力,高压控制活塞通过杠杆作用推动弹簧活塞腔缩回,斜盘摆角变小。

变量机构动力学方程为

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M \mp M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \pm FL \tag{9}$$

式中  $J$ ——斜盘转动惯量  
 $\theta$ ——斜盘摆角  $M$ ——斜盘阻力矩  
 $M_1$ ——刚体内柱塞不平衡力矩  
 $M_2$ ——斜盘摩擦力矩  
 $M_3$ ——滑靴柱塞摩擦副阻力矩  
 $M_4$ ——斜盘重力矩  $L$ ——力臂

公式中当  $\theta$  摆角增大取“-”运算符号,反之取“+”符号。

1.5 电液动力源仿真模型

建立完整的电液动力源仿真模型,须先建立变量泵、压力先导阀、变频器驱动电机子模型,见图 2,恒压泵主要参数如表 1 所示。变量泵子模型由单柱塞模型、斜盘动力学模型、变量机构机液力学模型、配流盘配流面积程序设计模型组成。柱塞旋转一周完成吸排油各一次,9 个柱塞之间的角度差为 40°。图 2 右上角为变频驱动三相异步电机的控制模型,基频电压信号和给定电压信号为变频部分的设定初始信号,压力和流量反馈电压信号为液压模型和变频模型的关联部分。仿真模型中  $K_1、K_2、K_3、K_4、K_5$  对应等效系数分别为:1.61、0.82、 $8.72 \times 10^{-3}$ 、2.19、 $4.61 \times 10^{-5}$ 。左上角为先导压力阀模型。电磁溢流阀和比例方向阀组合完成负载加载。蓄能器、电磁换向阀和二位三通换向阀回路完成转速提升、吸油压力补给,实现电机快速启动。

2 电液动力源动态特性试验测试

电液动力源特性试验参数主要包括负载输出压力、流量和功率。试验平台主要包括变频器、电机、恒压泵液压系统、dSPACE 信号处理器、硕华工控机、各种传感器。控制器对比例方向阀、压力先导阀、电磁换向阀进行控制。变频器输出功率(电机输入功率)采用 WT3000 型高精度功率测试仪进行测试,功率信号通过处理器集中采集到工控机,现场试验如图 3 所示。

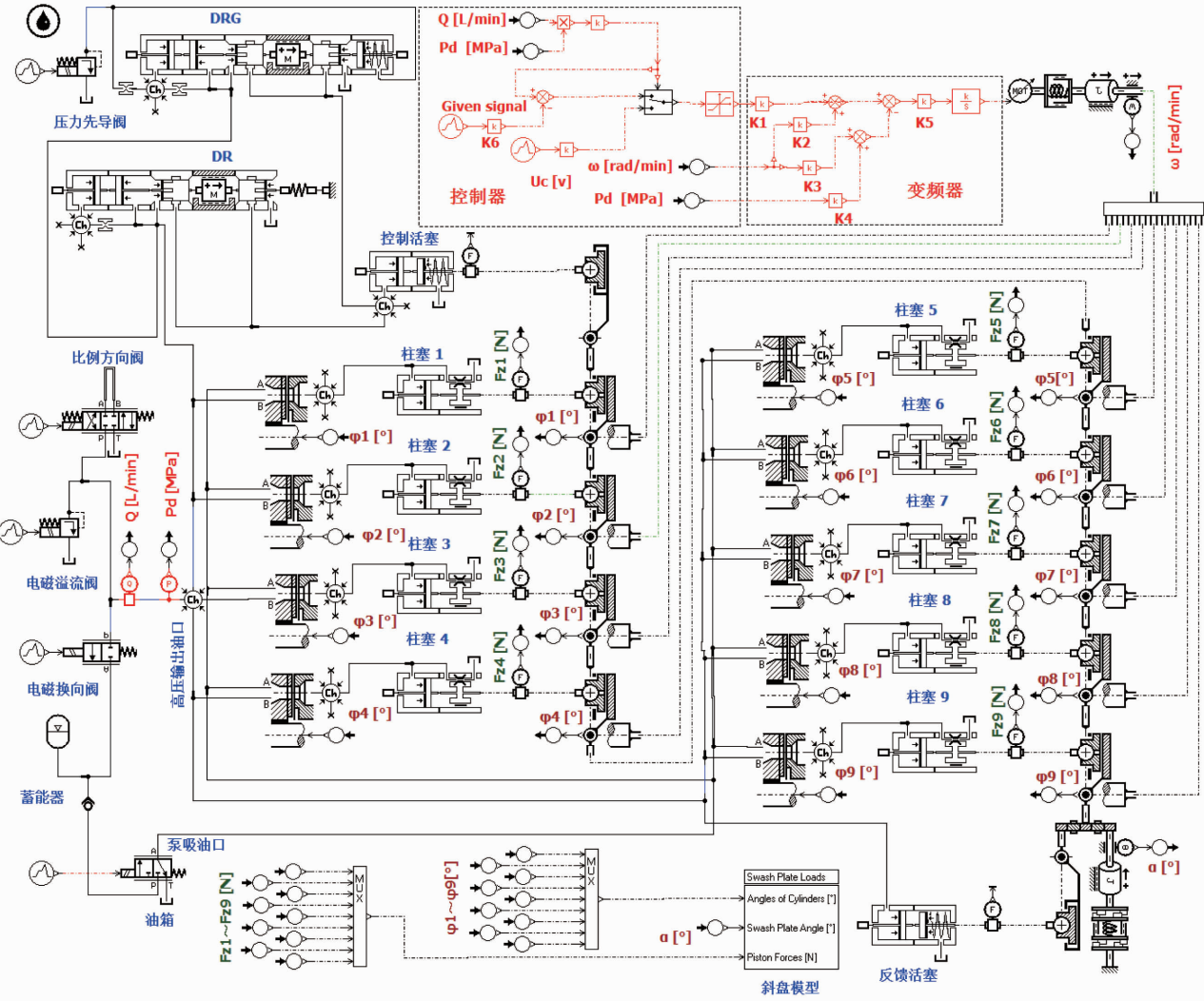


图 2 动力源仿真模型

Fig.2 Power source simulation model

| 表 1 主要参数                     |       |
|------------------------------|-------|
| Tab.1 Main parameters        |       |
| 参数                           | 数值    |
| 柱塞直径/mm                      | 17    |
| 柱塞数                          | 9     |
| 额定排量/cm <sup>3</sup>         | 45    |
| 回转盘直径/mm                     | 115   |
| 回转盘质量/g                      | 203   |
| 斜盘转动惯量/(g·m <sup>2</sup> )   | 4.92  |
| 活塞行程/mm                      | 28.2  |
| 配流槽分布圆内径/mm                  | 30    |
| 配流槽分布圆外径/mm                  | 36.50 |
| 柱塞死腔体积/cm <sup>3</sup>       | 5.70  |
| 斜盘最大摆角/(°)                   | 18    |
| 控制活塞直径/mm                    | 27.80 |
| 控制活塞质量/g                     | 170   |
| 斜盘质量/kg                      | 2.40  |
| 活塞弹簧刚度/(N·mm <sup>-1</sup> ) | 15    |

3 动力源动态特性分析

3.1 恒压特性

当电液动力源处于恒压模式时,比例方向阀开口



图 3 现场试验图

Fig.3 Test diagram

1. 变频驱动及液压系统 2. 控制及功率仪 3. 控制界面

度设置方波信号,变频频率 50 Hz 控制信号设为 1,线性关系。试验时控制信号分别设为 0.4、0.8、1 共 3 个电压,对应的转速为 450、1 200、1 500 r/min。比例方向阀实现通断前后,为了维持恒压泵恒压特性,分别将比例方向阀开度信号电压设置如图 4a 所示。在此基础先导阀上压力设为 20 MPa,仿真曲线见图 4b,试验曲线见图 4c。

由图 4c 得到,0~0.5 s 为负载流量突然变大工况,比例方向阀从 0 开始设定 1 个小口,负载流量突

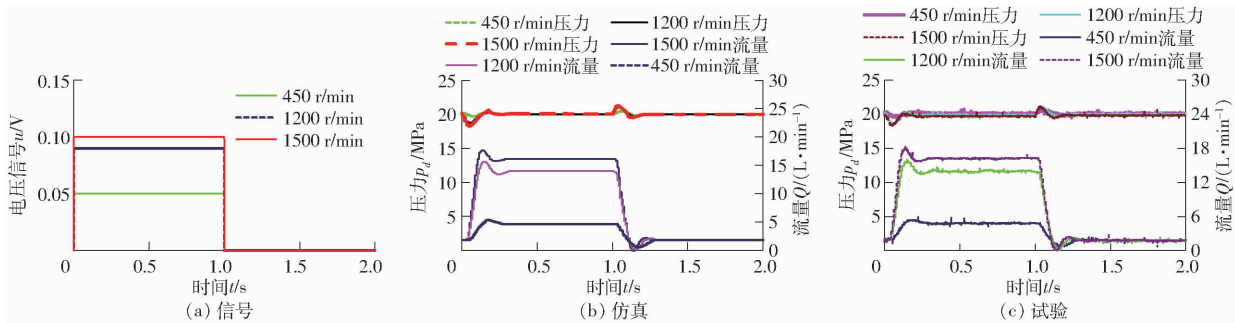


图4 不同频率恒压特性曲线

Fig. 4 Constant voltage characteristic curves at different frequencies

然增大,恒压模式被动失去平衡。为了保持设定的恒压模式,斜盘瞬间向最大摆角摆动,排量变大,负载流量增大,压力恢复设定值,达到新的平衡状态。当比例方向阀从1 s开始突然关闭时,负载不需流量输出,压力升高,斜盘回摆,处于内部卸荷状态。由转速450、1 200、1 500 r/min 试验数据可得,比例方向阀突然打开,恒压模式压力重新恢复恒压状态时间不超0.2 s,此过程斜盘摆角快速增大,系统输出流量增大,超调量不超15%;当比例方向阀突然关闭,斜盘快速将摆角变小,流量突然降低进入新的平衡模式,此时压力超调不超10%。恒压模式压力动态

响应快,超调低,具有良好的压力动态特性。仿真曲线和试验曲线相吻合,模型准确性较高。

### 3.2 流量特性

在非恒压工作模式下,电机转速可以提前设定。在V/F控制模式下,电磁溢流阀压力设置为8 MPa,比例方向阀关闭,通过溢流阀加载,此时泵处于最大排量工作模式,通过改变电机转速观察流量的变化,见图5a。变频电压信号给定一个脉冲信号(0.3~0.4 V),随着转速提升,泵输出流量加大,流量达到稳定输出时间超过1 s。进一步证实了变频异步电机启动较慢的问题。

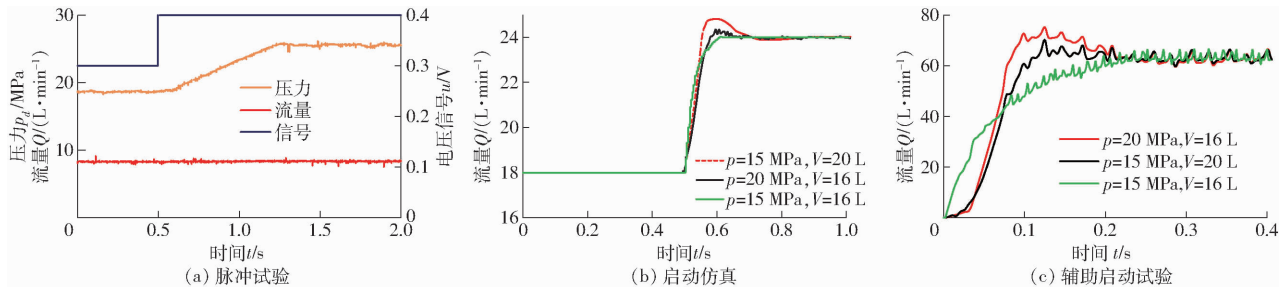


图5 流量特性曲线

Fig. 5 Flow characteristics

由试验过程可知,变频器与电机组成的动力源在液压泵转速提升时,动态响应较慢,所需时间较长。为了解决变频异步电机启动较慢问题,在转速提升过程中,通过蓄能器给恒压泵吸油口输入高压油液,使泵吸油腔注入高压油液拖动电机和泵加速启动。通过对不同蓄能器容积和充气压力组合进行仿真,经过组合分析,选定负载压力8 MPa,变频带载启动转速为0~1 500 r/min,蓄能器充气压力、容积分别设为20 MPa和16 L、15 MPa和16 L、15 MPa和20 L进行仿真分析,见图5b。

由图5b可得,蓄能器容积变大电机启动时间加快,充液压力增大启动达到平稳运行超调变大。变频启动系统蓄能器的容积及充气压力有关,对启动起决定性因素。变频启动由原来的几秒可以达到0.2 s内实现带载启动,解决了变频异步电机启动慢的问题。

按照仿真要求参数进行试验,选用要求的两个蓄能器,分别进行充气。利用电磁溢流阀进行加载,加载压力为8 MPa,试验结果见图5c。由图5c可知,3组试验启动时间都在0.2 s内,充气压力高启动快超调大。相同容积的蓄能器,充气压力大启动较快。通过蓄能器辅助启动解决了变频异步电机启动慢的问题,为变频控制液压系统提供了一种快速启动的方法。

## 4 功率特性分析

### 4.1 恒功率

变频V/F控制模式下,可以通过对负载压力控制实现恒功率。控制器设给定功率为6 kW,给定功率与泵输出压力进行运算,得出流量,按照电压控制信号与流量线性关系,可以得到所需控制压力。液压回路利用电磁溢流阀直接加载,将电磁溢流阀先

调高再调低过程,负载保持恒功率,控制变频器给定电压按照负载压力变化而变化,结果如图 6 所示。由图 6 可知,负载输出压力先升高后降低过程,输出流量变化恰好相反,功率保持不变。

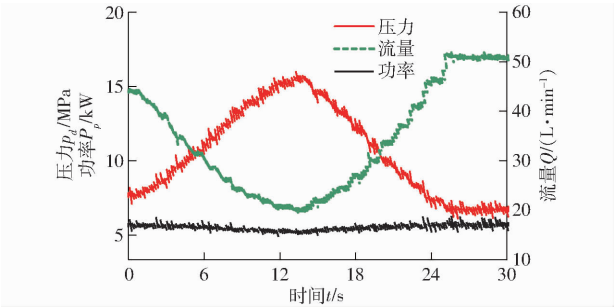


图 6 恒功率特性曲线

Fig. 6 Constant power characteristics

4.2 高压小流量及压力卸荷工况

在加紧、锁模、支撑等多种工况下,需要动力源高压小流量输出,减小溢流损失、降低驱动转速来提高能效。V/F 控制模式下恒压泵组成的电液动力源,利用恒压泵恒压特性,可以实现流量卸荷,满足高压小流量工况。在系统高压小流量工作状态下,可以继续降低电机转速,进一步达到节能降耗。试验设定变频控制信号电压为 0.3 ~ 1 V,对应电机转速为 450 ~ 1 500 r/min,压力先导阀设定压力为 8 MPa,比例方向阀关闭,电磁溢流阀压力高于压力先导阀压力,试验得高压小流量电机输出功率如图 7 所示。

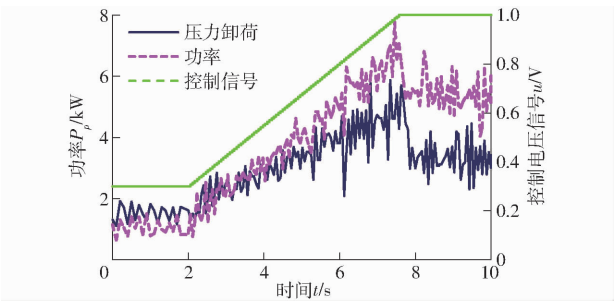


图 7 高压小流量下功率曲线

Fig. 7 Power curves under high pressure and small flow

在系统非工作周期,系统压力卸荷,流量全排量输出,通过降低电机转速可进一步降低系统能耗。试验过程将安全阀设压力为 0 MPa,此时系统卸压,全流量输出,对应电机转速从 450 ~ 1 500 r/min 匀速上升,得到压力卸荷,电机输出功率如图 7 所示。

设置电机转速 2 ~ 8 s 内为 450 ~ 1 500 r/min,电机功率从 1.6 kW 同步上升到 6.2 kW。当电机转速稳定在 1 500 r/min 后,功率稳定在 5.4 kW,在转速提升时由于电机加速导致功率增大。由试验得到高压小流量工况下,通过降低电机转速,系统功率降低 70.3%。在非工作周期,电机转速 2 ~ 8 s 内为

450 ~ 1 500 r/min,电机功率从 1.3 kW 同步上升至 5 kW。当电机转速稳定后为 3.7 kW,在非工作周期通过降低电机转速,系统功率可以降低 64.8%。利用变速驱动恒压泵,在高压小流量和非工作周期,通过降低电机的转速,系统功率分别降低 70.3% 和 64.8%。

4.3 恒压模式

在恒压模式下,负载需要流量恒定时,可以通过变转速和变排量组合的方式实现恒定输出流量。在系统中利用比例方向阀进行加载,在恒压模式下,输出流量恒定。通过变频器设定转速由 450 r/min 匀速提至 1 500 r/min,提速时间调整为 10 min,此时电机加速额外能耗可以忽略不计。设定数据组合保证电机最低转速为 450 r/min 时,变量泵通过调整排量可以输出设定流量,可以保证最低转速时排量没有达到最大值,保证试验进行过程转速和排量组合变化时刻有效,泵一直处在恒压模式下运行。采用 3 组调定流量和压力组合数据进行试验,增加试验准确性。3 组试验数据分别为压力 6 MPa 和流量 9 L/min、压力 11 MPa 和流量 14 L/min、压力 18 MPa 和流量 15 L/min,试验结果见图 8。随着转速提升 3 组试验数据最低转速 450 r/min 时功率分别为 1.8、4.3、7.2 kW,转速为 1 500 r/min 时功率分别为 5.6、8.1、10.9 kW。3 组数据最高转速和最低转速功率差分别为 3.8、3.8、3.7 kW,从试验数据可得到,恒压模式下负载压力和流量恒定时,可以通过大排量小转速组合实现系统能耗降低。从试验结果可得,该系统电机在最低转速运行能耗可降低 3.8 kW。

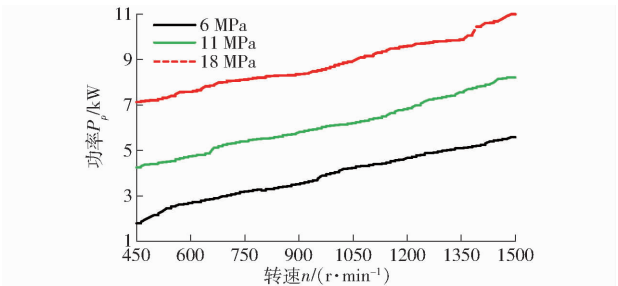


图 8 恒功率模式变转速功率曲线

Fig. 8 Constant power mode variable speed power curves

5 结论

- (1) 仿真和试验结果表明,该电液动力源可以实现压力、流量、功率控制,控制方式简单、灵活。
- (2) V/F 控制模式下,通过蓄能器补给变量泵吸油压力能,解决因变频异步电机启动慢的问题。在负载压力为 8 MPa 时,在 0.2 s 内可以使电机转速上升到 1 500 r/min。

(3) 电液动力源在高压小流量和非工作周期通过降低电机转速, 电机功率分别可以降低 70.3% 和 64.8%; 恒压模式下, 大排量低转速该系统能耗可降低 3.8 kW。

### 参 考 文 献

- [1] 薛亚峰. 全液控变量泵复合控制功能的仿真分析[J]. 流体传动与控制, 2015, 69(2): 33–39.  
XUE Yafeng. Simulation and analysis of compound control function of complete hydraulic control variable displacement pump[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2015, 69(2): 33–39. (in Chinese)
- [2] 王巍, 张锐, 刘晓卫, 等. 变转速输入变量泵恒流量控制器设计[J]. 控制工程, 2015, 22(5): 875–880.  
WANG Wei, ZHANG Rui, LIU Xiaowei, et al. Constant flow controller design of axial piston variable displacement pump[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(5): 875–880. (in Chinese)
- [3] 张晓刚, 王翔宇, 张红娟, 等. 闭式泵控三腔液压缸驱动装载机举升装置特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 410–418.  
ZHANG Xiaogang, WANG Xiangyu, ZHANG Hongjuan, et al. Characteristics of wheel loader lifting device based on closed pump-controlled three chamber hydraulic cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 410–418. (in Chinese)
- [4] 何智, 刘庆庭, 区颖刚. 甘蔗收获机双向变量柱塞泵动态响应特性仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 329–336.  
HE Zhi, LIU Qingting, OU Yinggang. Dynamic response characteristic simulation of double-action variable displacement plunger pump for sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 329–336. (in Chinese)
- [5] 张德胜, 王海宇, 施卫东, 等. 轴流泵多工况压力脉动特性试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 139–146.  
ZHANG Desheng, WANG Haiyu, SHI Weidong, et al. Experimental investigation of pressure fluctuation with multiple flow rates in scaled axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 139–146. (in Chinese)
- [6] KASSEM S A, BAHR M K. Effect of port plate silencing grooves on performance of swash plate axial piston pumps[C]//7th Mechanical Design and Production Congress MDP7. Cairo University, Cairo, Egypt, 2000: 139–148.
- [7] HUANG Jiahai, ZHAO Bin, QUAN Long, et al. Development of an asymmetric axial piston pump for displacement-controlled system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(8): 1418–1430.
- [8] MANDAL N P, SAHA R, SANYALI D. Effects of flow inertia modeling and valve-plate geometry on swash-plate axial-piston pump performance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2012, 226(3): 451–465.
- [9] HARRION A M, EDGE K A. Reduction of axial piston pump pressure ripple[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2000, 214(1): 53–63.
- [10] HUANG Jiahai, QUAN Long, ZHANG Xiaogang. Development of a dual-acting axial piston pump for displacement controlled system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(4): 606–616.
- [11] 郝云晓, 夏连鹏, 葛磊, 等. 液电混合直线驱动系统位置控制特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 379–385.  
HAO Yunxiao, XIA Lianpeng, GE Lei, et al. Position control performance of hydraulic electric hybrid linear drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 379–385. (in Chinese)
- [12] 王翔宇, 葛磊, 赵斌, 等. 液电混合驱动电铲提升系统能效特性研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 418–426.  
WANG Xiangyu, GE Lei, ZHAO Bin, et al. Energy efficiency characteristics of cable shovel lifting system driven by hydraulic-electric hybrid system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 418–426. (in Chinese)
- [13] KIM J H, JOEN C S, HONG Y S. Constant pressure control of a swash plate type axial piston pump by varying both volumetric displacement and shaft speed[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(10): 2395–2401.
- [14] 张德胜, 耿琳琳, 施卫东, 等. 轴流泵水力模型压力脉动和振动特性试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 66–72.  
ZHANG Desheng, GENG Linlin, SHI Weidong, et al. Experimental investigation on pressure fluctuation and vibration in axial-flow pump model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 66–72. (in Chinese)
- [15] 王永玲, 赵秋霞, 姚平喜. 采用变频调速的砌块成型机液压系统节能分析[J]. 液压与气动, 2015, 39(3): 40–43.  
WANG Yongling, ZHAO Qiuxia, YAO Pingxi. Energy-saving analysis on hydraulic system of block for ming machine by frequency control[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, 39(3): 40–43. (in Chinese)
- [16] DARKO L, MITJA K, SAMO U. Electro-hydraulic load sensing with a speed-controlled hydraulic supply system on forming-machines[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2009, 41: 1066–1075.
- [17] 张红娟, 权龙, 李斌. 注塑机电液控制系统能量效率对比研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(8): 180–187.

- ZHANG Hongjuan, QUAN Long, LI Bin. Comparative study on energy efficiency of the electro-hydraulic control system in injection molding machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(8): 180–187. (in Chinese)
- [18] 柯良, 惠相君, 王卫东. 变频泵控液压调速系统建模与仿真[J]. 液压与气动, 2014, 38(11): 53–58.  
KE Liang, HUI Xiangjun, WANG Weidong. Modeling and simulation of variable frequency pump control hydraulic speed governing system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014, 38(11): 53–58. (in Chinese)
- [19] 田晴晴, 谷立臣, 贾永峰. 伺服电机驱动定量泵液压源系统的恒功率特性[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(3): 116–120.  
TIAN Qingqing, GU Lichen, JIA Yongfeng. Study on constant power characteristics of hydraulic source system driven by servo motor fixed-displacement pump[J]. Machine Design and Research, 2014, 30(3): 116–120. (in Chinese)
- [20] 王成宾. 伺服变量泵和泵控差动缸系统理论分析及静动态特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.  
WANG Chengbin. Theoretical analysis and static and dynamic characteristics study on servo variable piston pump and pump-controlled differential cylinder system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [21] TASNER T, LES K, TIC V, et al. Energy efficiency of different electrohydraulic drives [C] // Proceedings of the 9th International Fluid Power Conference, 2014: 14–25.
- [22] 权龙, 李凤兰, 王祥. 伺服电机定量泵驱动差动液压缸系统效率的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 93–98.  
QUAN Long, LI Fenglan, WANG Xiang. Study on the efficiency of differential cylinder system driven with servo motor and constant pump[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(8): 93–98. (in Chinese)
- [23] 李会妨, 权龙, 郝云晓, 等. 电比例斜盘式恒压柱塞泵的联合仿真与特性研究[J]. 液压与气动, 2019, 43(9): 1–7.  
LI Huifang, QUAN Long, HAO Yunxiao, et al. Co-simulation and characteristics of proportional constant pressure swashplate piston pump[J]. Chinese Hydraulic & Pneumatics, 2019, 43(9): 1–7. (in Chinese)
- [24] 闫政, 权龙, 张晓刚. 电液比例变量泵动态特性仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 380–387.  
YAN Zheng, QUAN Long, ZHANG Xiaogang. Simulation and experimental research on dynamic characteristics of electro-hydraulic proportional variable pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 380–387. (in Chinese)
- [25] 刘彬, 闫政, 葛磊, 等. 小型液压挖掘机电驱动动力源特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 387–393.  
LIU Bin, YAN Zheng, GE Lei, et al. Electric drive hydraulic power source characteristics of small hydraulic excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 387–393. (in Chinese)
- [26] XIA Lianpeng, QUAN Long, GE Lei, et al. Energy efficiency analysis of integrated drive and energy recuperation system for hydraulic excavator boom[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 156: 680–687.

(上接第 407 页)

- [14] WOO S, PARK J, LEE J, et al. CBAM: convolutional block attention module [C] // European Conference on Computer Vision. ECCV, 2018: 3–19.
- [15] HU G, YANG X, ZHANG Y, et al. Identification of tea leaf diseases by using an improved deep convolutional neural network [J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 24(100353): 1–8.
- [16] HU Y, HUBER A, ANUMULA J, et al. Overcoming the vanishing gradient problem in plain recurrent networks [J]. Computer Science, 2018, 18: 20–32.
- [17] 徐岩, 李晓振, 吴作宏, 等. 基于残差注意力网络的马铃薯叶部病害识别[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 76–83.  
XU Yan, LI Xiaozhen, WU Zuohong, et al. Potato leaf disease recognition via residual attention network [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 40(2): 76–83. (in Chinese)
- [18] 杨其睿. 基于改进的 DenseNet 深度网络火灾图像识别算法[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(2): 258–263.  
YANG Qirui. Fire image recognition algorithm based on improved DenseNet network [J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(2): 258–263. (in Chinese)
- [19] 吴云志, 刘翱宇, 朱小宁, 等. 一种植物病害图像识别卷积网络架构[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(1): 150–156.  
WU Yunzhi, LIU Aoyu, ZHU Xiaoning, et al. A convolutional network for plant disease image recognition (FI-DenseNet) [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(1): 150–156. (in Chinese)
- [20] 张怡, 赵珠蒙, 王校常, 等. 基于 ResNet 卷积神经网络的绿茶种类识别模型构建[J]. 茶叶科学, 2021, 41(2): 261–271.  
ZHANG Yi, ZHAO Zhumeng, WANG Xiaochang, et al. Construction of green tea recognition model based on ResNet convolutional neural network [J]. Journal of Tea Science, 2021, 41(2): 261–271. (in Chinese)
- [21] 龙满生, 欧阳春娟, 刘欢, 等. 基于卷积神经网络与迁移学习的油茶病害图像识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 194–201.  
LONG Mansheng, OUYANG Chunjuan, LIU Huan, et al. Image recognition of camellia disease based on convolutional neural network and transfer learning [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 194–201. (in Chinese)