

# 纯电驱动工程机械自动怠速系统参数优化与试验

任好玲 林添良 黄伟平 付胜杰 陈其怀

(华侨大学机电及自动化学院, 厦门 361021)

**摘要:** 针对工程机械节能需求,考虑挖掘机的典型工况,以保证在取消怠速恢复工作时执行器入口能快速建立压力为目标,提出一种基于蓄能器的二级怠速控制系统,通过检测先导手柄压力、液压泵出口压力、执行器入口压力和蓄能器压力等作为判断条件,制定驱动电机转速切换规则。对影响怠速过程的关键元件液压蓄能器的性能参数进行分析,以选定的蓄能器参数在某1.5 t纯电驱动挖掘机上进行试验,结果表明所提出的二级自动怠速控制系统能在两级怠速之间切换,且具有蓄能器的自动怠速系统,与无自动怠速控制的系统相比,节能达36%;与无蓄能器的自动怠速系统相比,恢复工作时执行器压力建立更迅速,压力更平稳,具有较好的操作稳定性。

**关键词:** 纯电驱动; 工程机械; 自动怠速; 液压蓄能器; 参数优化; 试验

**中图分类号:** TH137    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0358-07

## Parameters Optimization and Experiment of Idle-speed Control System of Construction Machinery Driven by Electric Power

Ren Haoling Lin Tianliang Huang Weiping Fu Shengjie Chen Qihuai

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Considering energy saving and typical working condition of construction machinery, a two-level idle-speed control system based on hydraulic accumulator was proposed to ensure the quick pressure rising at inlet of working chamber of actuator when the idle speed was canceled and the actuator started a new working cycle. The mathematical model of the proposed idle speed control system was developed. The values of the two-level motor speed were obtained according to motor response and characteristics of the pump. The rules of motor speed switch between the two-level idle-speed and the normal working speed were made by detecting the pressures of joystick, pump, two chambers of actuator and accumulator. The parameters of the hydraulic accumulator which was the key component of the idle-speed control system were analyzed through simulation. The experiment was carried out on a 1.5 t hydraulic excavator driven by electric power using the obtained parameters of hydraulic accumulator. The comparisons between the idle speed control system with and without hydraulic accumulator and the system without idle speed control were carried out on the testing. The test results showed that the proposed two-level idle-speed control system worked well. Compared with the system without idle-speed control, the proposed control system with hydraulic accumulator can save up to 36% energy. While compared with the idle-speed control without hydraulic accumulator, the inlet pressure of the actuator was raised more quickly and steadily in the proposed control system. This indicated that the proposed system can achieve good energy saving and control performance.

**Key words:** electric drive; construction machinery; idle-speed; accumulator; parameter optimization; experiment

收稿日期: 2016-06-21 修回日期: 2016-07-19

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51505160、51205140)、流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金项目(GZKF-201517)、福建省自然科学基金项目(2015J01206)和华侨大学中青年骨干教师科研提升计划项目(ZQN-YX201)

**作者简介:** 任好玲(1978—),女,讲师,博士,主要从事电液元件与节能研究,E-mail: happyrhilly@126.com

**通信作者:** 林添良(1983—),男,副教授,博士,主要从事工程机械节能技术研究,E-mail: ltlxl@163.com

## 引言

随着排放法规的日益严格,工程机械亟需应对节能环保压力,各种节能减排方案如正流量系统<sup>[1-2]</sup>、负流量系统<sup>[3]</sup>、负载敏感<sup>[4-5]</sup>、混合动力<sup>[6-7]</sup>和怠速控制<sup>[8]</sup>等技术被提出并在一些机型上进行推广和应用。

一般而言,工程机械的工作过程是一个周期性循环过程,在一个工作周期中,停止工作的时间约占30%<sup>[9]</sup>,为降低这一停止工况中动力驱动系统的能量输出,大多数工程机械都设计了自动怠速功能来降低工程机械的排放和能耗<sup>[10]</sup>。传统的自动怠速控制是在发动机高低两级转速之间的切换控制,国内学者对其进行了大量的相关研究<sup>[11-17]</sup>。国外则更多地将智能算法应用于发动机的怠速控制以提高发动机在高低速切换时的响应速度,但算法较复杂,难以在工程上精确实现<sup>[18-19]</sup>。目前,常用工程机械的自动怠速控制一般针对发动机进行,且存在一些不足之处:①发动机由于本身特性限制导致调速范围窄,且其怠速转速不能太低,故转速差较小,节能效果不明显。②怠速时,只是简单地降低转速来降低发动机的燃油消耗,液压驱动系统仍存在较多损耗。③恢复工作时,液压泵出口压力建立较慢,难以快速驱动执行器运动。

针对传统工程机械自动怠速控制的不足,提出一种以纯电驱动工程机械为应用对象的自动怠速控制系统,介绍其基本结构和工作原理,分析影响怠速过程操控性和节能性的关键参数,并通过仿真与试验研究验证该自动怠速控制系统的有效性和节能性。

## 1 自动怠速控制系统的结构和工作原理

针对现有自动怠速系统存在的不足,设计的自动怠速控制系统结构原理如图1所示,其基本工作过程为:

当先导操作手柄回到中位,控制器检测到先导手柄两侧压差绝对值小于某正值时,控制器发出信号,使多路换向阀处于中位。

(1)一级怠速:若蓄能器的压力低于执行器两腔最大压力某设定阈值时,此时控制器使电磁换向阀1和2均通电,液压泵通过电磁换向阀1给蓄能器充油,控制器使变频电机处于一级怠速转速;当控制器检测到蓄能器压力达到设定值后,控制器使电磁换向阀1和2均处于断电状态,液压泵通过电磁换向阀2回油卸荷,从而降低了怠速工作时液压泵和驱动电机的无功损耗。这一过程即为一级怠速过程。

(2)二级怠速:当控制器检测到操作手柄处于中位的时间超过设定时间后,此时进入二级怠速控制阶段,控制器使得驱动电机处于较低的二级转速下运转。

(3)恢复工作:当先导操作手柄离开中位,控制器检测到两侧压力差绝对值大于设定值时,取消怠速工况恢复工作,控制器根据先导手柄信号使多路控制阀处于相应工位,电磁换向阀1和2均通电,切断液压泵与油箱的通路,并将蓄能器中储存的液压油引入到多路阀的入口,辅助液压泵快速建立压力,促使执行器快速运动;当蓄能器的出口压力小于等于液压泵的出口压力时,电磁换向阀1断电,使蓄能器的压力保持。

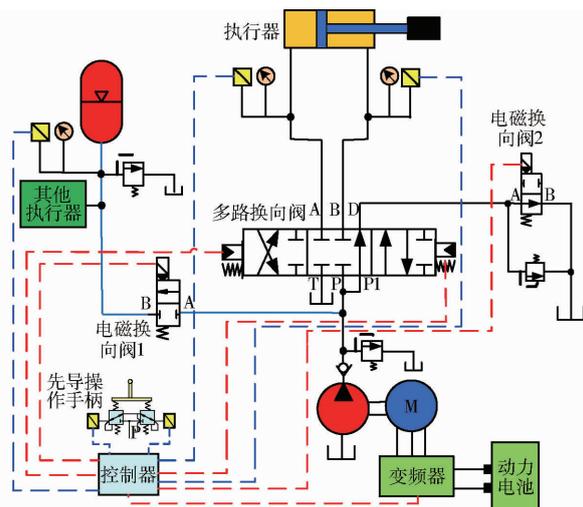


图1 二级自动怠速控制系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of two-level idle-speed control system

由上述看出,所提出的自动怠速控制系统能克服传统怠速控制系统的不足,二级怠速具有较大转速差,怠速过程中液压泵处于卸荷状态,降低了不必要的能量损失,且由于蓄能器的存在,在取消怠速时,液压泵出口能够快速建立起压力以克服负载促使执行器快速运动。

## 2 自动怠速系统建模分析

当图1中的电磁换向阀1处于下位,切断蓄能器与主回路的通路时,即不考虑液压蓄能器对系统的影响,此时即简化成无蓄能器的自动怠速控制系统。本文主要研究有、无蓄能器参与2种情况下的二级自动怠速控制及取消怠速时系统的操控性和节能性。

### 2.1 自动怠速系统建模

根据自动怠速控制规则,进入一级怠速后,控制器使驱动电机的转速降为一级怠速设定转速;此时若蓄能器压力小于负载两腔的最大压力目标值时,液压泵需给蓄能器充油到目标值;液压泵的出口再

与油箱相通进行卸荷。在蓄能器充油过程中,液压泵的输出流量方程为

$$Q_p = V_p n - (C_{ip} - C_{ep}) p_p \quad (1)$$

式中  $Q_p$ ——液压泵输出流量, L/min

$n$ ——液压泵转速, r/min

$V_p$ ——液压泵排量, mL/r

$C_{ip}$ 、 $C_{ep}$ ——液压泵内、外泄漏系数,  $m^3/(Pa \cdot s)$

$p_p$ ——液压泵出口压力, MPa

图2是蓄能器的结构和受力示意图<sup>[20]</sup>。

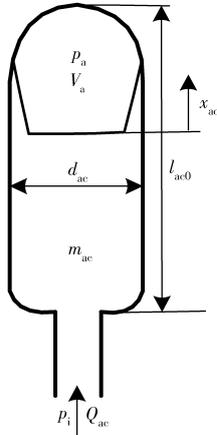


图2 蓄能器结构和受力示意图

Fig.2 Structure and forces schematic of accumulator

蓄能器中油液的受力方程为

$$(p_i - p_a) A_{ac} = m_{ac} \frac{d^2 x_{ac}}{dt^2} + b_{ac} \frac{dx_{ac}}{dt} \quad (2)$$

式中  $p_i$ ——蓄能器入口压力, MPa

$p_a$ ——蓄能器内气体压力, MPa

$A_{ac}$ ——蓄能器腔有效作用面积,  $m^2$

$m_{ac}$ ——蓄能器内液体质量, kg

$x_{ac}$ ——蓄能器内油液界面运动距离, m

$b_{ac}$ ——蓄能器内油液粘性摩擦系数,  $N \cdot s/m$

由

$$\frac{dx_{ac}}{dt} = \frac{Q_{ac}}{A_{ac}} \quad (3)$$

可推出蓄能器的压力与流量的关系为

$$p_i - p_a = L_{ac} \frac{dQ_{ac}}{dt} + R_{ac} Q_{ac} \quad (4)$$

其中

$$L_{ac} = \frac{m_{ac}}{A_{ac}^2} = \frac{\rho l_{ac}}{A_{ac}} \quad (5)$$

$$R_{ac} = \frac{b_{ac}}{A_{ac}^2} = \frac{128\mu l_{ac}}{\pi d_{ac}^4} \quad (6)$$

$$l_{ac} = l_{ac0} + x_{ac} \quad (7)$$

式中  $Q_{ac}$ ——流入蓄能器的液体的流量, L/min

$L_{ac}$ ——蓄能器内液腔液感,  $kg/m^4$

$R_{ac}$ ——蓄能器内液腔液阻,  $kg/(s \cdot m^4)$

$d_{ac}$ ——蓄能器液腔直径, m

$l_{ac}$ ——蓄能器内液腔长度, m

$l_{ac0}$ ——蓄能器充油开始前液腔长度, m

由于在怠速过程中,换向阀2切断液压泵与油箱的通道,液压泵的输出流量全部进入到液压蓄能器中,因此液压泵的输出流量等于液压蓄能器的输入流量,即

$$Q_{ac} = Q_p \quad (8)$$

当恢复工作时,蓄能器和液压泵一起为执行器提供流量。

多路阀可以看做一个节流阀,通过它的流量可表示为

$$Q_v = K_Q x_v + K_C (p_p - p_L) \quad (9)$$

式中  $K_Q$ ——比例节流阀的流量增益,  $m^2/s$

$K_C$ ——比例节流阀流量压力系数,  $m^3/(Pa \cdot s)$

$x_v$ ——比例节流阀阀口开度位移, m

$p_L$ ——执行器无杆腔压力, MPa

流过多路阀的流量是蓄能器释放流量与液压泵提供流量之和,即

$$Q_v = Q_{ac} + Q_p \quad (10)$$

而多路阀流出的流量全部流入执行器,即

$$Q_v = Q_L = A_L v \quad (11)$$

式中  $Q_L$ ——流入到执行器的流量, L/min

$A_L$ ——执行器无杆腔的面积,  $m^2$

$v$ ——执行器活塞的运动速度, m/s

由式(1)、(10)和式(11)推得

$$v = \frac{Q_L}{A_L} = \frac{Q_v}{A_L} = \frac{V_p n - (C_{ip} - C_{ep}) p_p + Q_{ac}}{A_L} \quad (12)$$

图3为所使用的电机从不同起始转速升高900 r/min的空载响应曲线,从图看出,从静止开始起动具有较大的滞后,从500 r/min开始升高时的响应滞后时间约为0.5 s,从800 r/min开始升高时的响应滞后时间约为0.3 s。受到液压泵的自吸性能和内泄漏等因素的限制,驱动电机的转速不宜太低,且带动负载后,电机的响应速度也会相应减慢,不能满足取消怠速恢复工作时的响应要求。考虑到电机的正常工作范围为1200~1500 r/min,综合考虑节能性和响应特性,将800 r/min设为一级怠速转速,500 r/min设为二级怠速转速。

## 2.2 性能分析

在自动怠速过程中,需要液压泵给蓄能器供油使其储存一定的压力油,而在恢复工作过程中,蓄能器中的油液释放出来,辅助液压泵驱动执行器。因此需要考察这个过程中液压泵消耗的能量及蓄能器的加入对执行器的工作性能的影响,即考察系统的节能性和操控性。

液压泵输出的功率  $P_p$  为

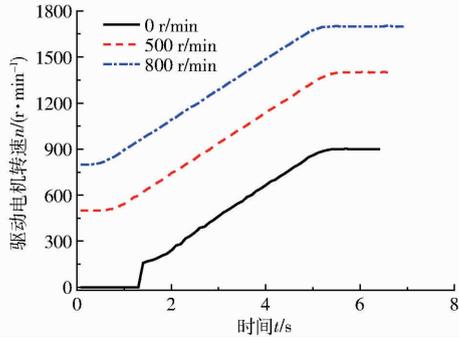


图 3 电机的转速曲线

Fig. 3 Curves of motor speed

$$P_p = p_p Q_p = p_p [V_p n - (C_{ip} - C_{ep}) p_p] \quad (13)$$

式中  $P_p$ ——液压泵的输出功率, kW

$n$ ——驱动电机转速, r/min

蓄能器储存的能量为

$$E = \frac{p_a V_{ac}}{1 - \gamma} \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right] = \frac{p_a l_{ac} A_{ac}}{1 - \gamma} \left[ 1 - \left( \frac{p_a}{p_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right] \quad (14)$$

式中  $E$ ——蓄能器储存能量, J

$V_{ac}$ ——蓄能器额定容积, L

$p_2$ ——蓄能器最大压力, MPa

$\gamma$ ——绝热指数, 由于蓄能器的充放热速度很快, 因此近似为绝热过程, 取  $\gamma = 1.4$

从式(14)可看出, 蓄能器的储能量与它的充气压力、最大压力、额定容积有关; 从式(12)看出, 执行器恢复工作后的运动性能不仅与蓄能器的参数有关, 还与电机的转速有关。

### 3 自动怠速系统的参数优化

针对图 1 所示系统建立自动怠速控制系统的 AMESim 模型, 如图 4 所示, 仿真所需参数根据所搭建的自动怠速控制系统的基本参数进行选取, 与本研究相关的参数如表 1 所示。

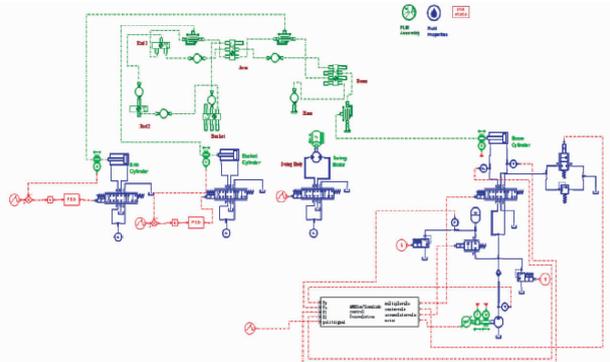


图 4 二级自动怠速系统 AMESim 仿真模型

Fig. 4 AMESim model of two-level idle-speed control system

表 1 仿真过程基本参数

Tab. 1 Basic parameters used in simulation

参数	数值
执行器活塞直径/mm	63
执行器活塞杆直径/mm	35
执行器行程范围/mm	110 ~ 340
驱动电机额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 500
一级怠速转速/(r·min <sup>-1</sup> )	800
二级怠速转速/(r·min <sup>-1</sup> )	500

考虑到执行器在工作时的最大压力为 8 MPa, 根据文献[4]的计算方法, 对蓄能器的参数进行初步计算, 求得: 蓄能器的充气压力  $p_0 \geq 2$  MPa, 最低工作压力  $p_1 \geq 2.2$  MPa, 最大工作压力  $p_2 = 8$  MPa, 蓄能器的额定容积  $V_{ac} = 1.1 \sim 5$  L。

#### 3.1 液压蓄能器体积对系统特性的影响

在图 4 所示仿真模型中, 选取液压蓄能器容积分别为 1.6、2.0、2.5、3.0 L 进行仿真, 在图 5 所示先导操作手柄信号下, 根据自动怠速判断规则, 电机的转速逐渐从额定转速降为一级怠速转速及二级怠速转速。从图 5 看出, 先导手柄在 3 s 时回中位, 在 34 s 时恢复工作, 当手柄回中位 8 s 后电机转速降为一级怠速转速 800 r/min, 同时为蓄能器充油; 一级怠速 20 s 后, 若手柄仍处于中位, 则电机转速降为二级怠速转速 500 r/min。

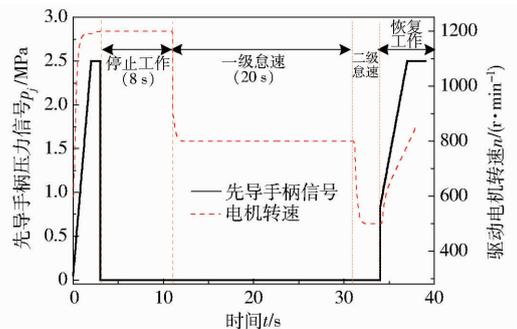


图 5 先导操作手柄的输出信号与驱动电机转速曲线

Fig. 5 Curves of joystick and motor speed

从图 6 可看出, 自动怠速系统的液压泵出口压力和蓄能器的充油压力在一级怠速时逐渐升高, 除蓄能器容积为 3 L 时由于容积较大, 需要更多的液压油使其达到额定压力外, 其他容积的蓄能器均能在设定的一级怠速时间内达到设定压力。当恢复工作时, 执行器的运动速度基本没有差别, 液压泵能够在蓄能器压力降到设定最小压力前建立起压力。在一级怠速期间, 1.6 L 的蓄能器所需要液压泵为其提供的能量最低, 最具有节能性。

图 7 所示为蓄能器容积为 1.6 L 及无蓄能器情况下, 自动怠速系统在恢复工作时执行器入口的压力和流量曲线, 当没有蓄能器为系统补油时, 执行器

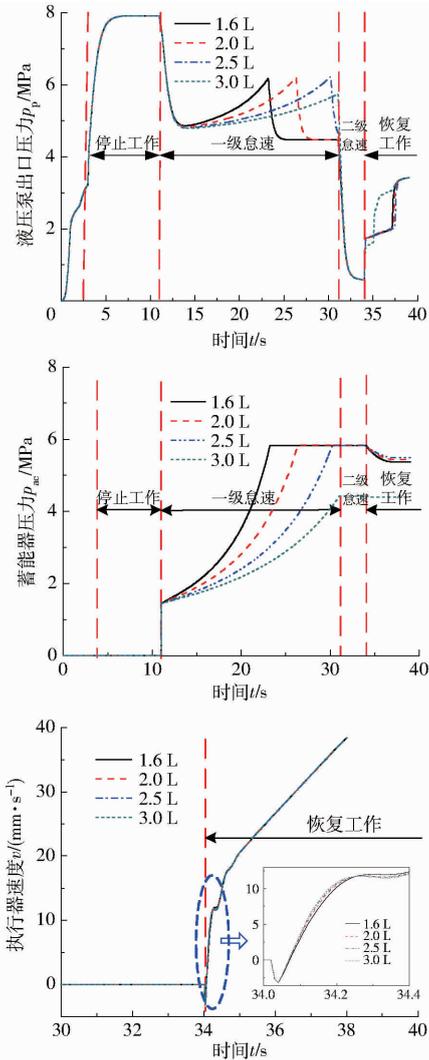


图6 液压蓄能器容积对自动怠速系统性能的影响

Fig. 6 Influence of volume of accumulator on performance of idle-speed control system

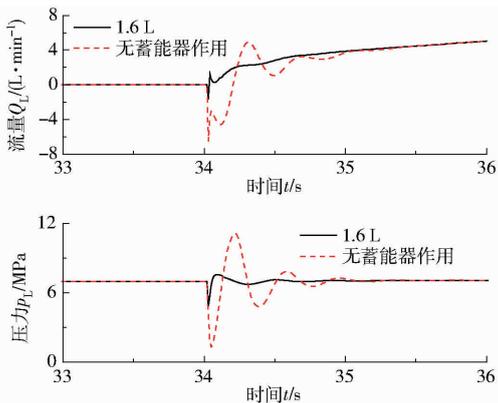


图7 执行器入口压力和流量对比曲线

Fig. 7 Compared curves of inlet pressure and flow rate of actuator

的入口压力和流量波动较大,从而引起执行器的速度波动较大,影响操控性。

由于蓄能器额定容积为 1.6 L 时执行器消耗液压泵能量最少,最具节能性,因此选定蓄能器的容积为 1.6 L。

### 3.2 液压蓄能器充气压力对系统特性的影响

图 8 为液压蓄能器充气压力为 2、3、4 MPa 时的对比曲线。由图看出,蓄能器的充气压力越高,达到相同充油压力所需时间越短,但液压泵消耗的能量近似相等。

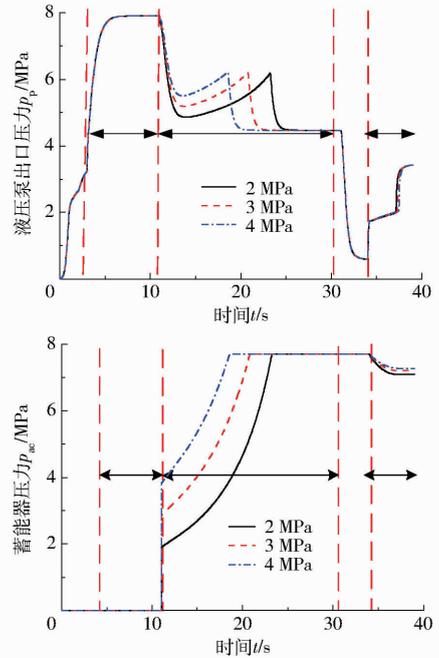


图8 液压蓄能器充气压力对系统特性的影响

Fig. 8 Influence of charge pressure of accumulator on performance of idle-speed control system

当恢复工作时,充气压力越高,所能释放的压力油越少,执行器恢复目标速度的响应越慢,因此充气压力选择 2 ~ 3 MPa 之间,自动怠速系统的综合性能最优。

综上所述,通过仿真,确定了基于蓄能器的自动怠速系统的液压蓄能器的基本参数为:额定容积 1.6 L,充气压力 2 ~ 3 MPa 作为试验研究参数选择的基本依据。

## 4 试验

针对所提出的二级自动怠速系统,在实验室的某 1.5 t 纯电动液压挖掘机上进行试验研究。试验过程中所用到的其他主要参数如表 2 所示,图 9 是试验台的实物图。

表2 关键元件的主要参数

Tab. 2 Basic parameters of key components

关键元件	参数	数值
动力电机	额定功率/kW	8
	额定转速/( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	1 500
液压泵	排量/( $\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$ )	16
液压蓄能器	容量/L	1.6
	充气压力/MPa	2

图 10 是先导操作手柄的压力信号及驱动电机转速曲线,对比图 5 的仿真曲线可以看出,驱动电机基本实现了两级自动怠速控制,在一级怠速过程中转速逐渐降低而不是仿真中的直接降为 800 r/min;当恢复工作时,电机能较快地从 500 r/min 达到目标设定转速,基本实现了自动怠速系统对于驱动电机的性能要求。



图 9 测试试验台

Fig. 9 Photo of test rig

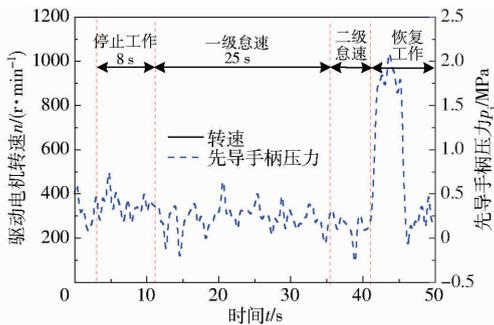


图 10 先导操作手柄信号与驱动电机转速实测曲线

Fig. 10 Test curves of joystick and motor speed

图 11 是液压泵出口压力、蓄能器压力和执行器入口压力的对应曲线,由图看出,当进入一级怠速时,液压泵对蓄能器充油,两者压力逐渐升高,当达到蓄能器最大压力后,两者基本保持;在二级怠速期间,由于液压泵驱动电机的转速进一步降低,且其出口经过换向阀回油箱卸荷,因此保持较低压力;而在恢复工作时,蓄能器内储存的压力油释放以补偿液压泵的出口压力建立的滞后,从而使执行器入口压力能在恢复工作后快速建立。

图 12 是有无蓄能器情况下液压泵出口压力和执行器入口压力的对比曲线。从图 12 可看出,有蓄能器时,在恢复工作时,液压泵出口压力升高较快,而无蓄能器时,液压泵出口压力建立较慢,从而也导致执行器的入口压力在恢复工作后有将近 3 s 的滞后,且较有蓄能器的情况下晚达到最大压力,因此执行器的响应速度较慢。且在恢复工作后,压力建立过程的压力上升曲线亦能看出,有蓄能器情况下,无论是液压泵压力还是执行器压力均比较平缓,而无

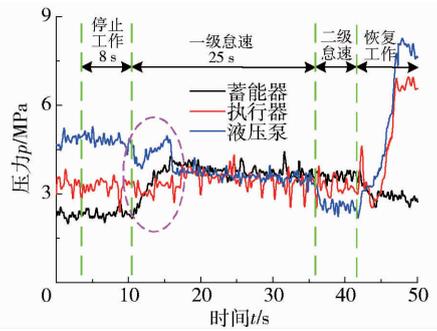


图 11 压力实测曲线

Fig. 11 Test curves of pressures

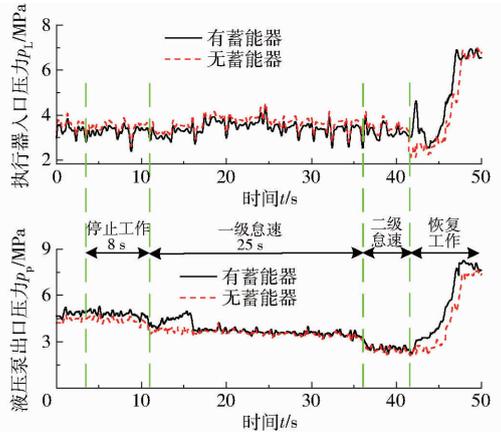


图 12 有、无蓄能器参与怠速的压力对比

Fig. 12 Comparison of pressures between system with and without accumulator

蓄能器情况下,压力曲线有一定的抖动现象,这也会导致执行器的操控性变差。

图 13 是有、无蓄能器参与自动怠速过程时液压泵在二级怠速期间消耗能量的对比曲线,由图看出,有蓄能器参与时,液压泵消耗的能量为 32 kJ,无蓄能器参与时液压泵消耗的能量为 30 kJ,无自动怠速时液压泵消耗的能量为 50 kJ,因此,有蓄能器的自动怠速系统的节能效率为 36%,无蓄能器的自动怠速系统的节能效率为 40%。有蓄能器的自动怠速系统由于在一级怠速期间为蓄能器充油而消耗了约 2 kJ 的能量,但这部分能量在恢复工作后回馈给系统,保证了执行器的快速响应。

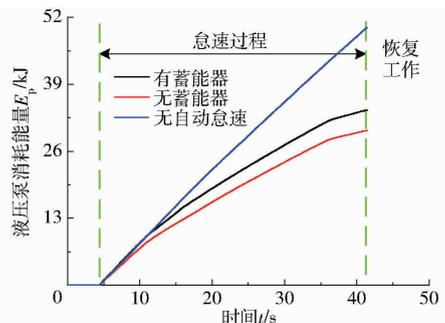


图 13 自动怠速时液压泵消耗能量对比曲线

Fig. 13 Comparison of consumed energy of pump of three different systems during idle-speed control

## 5 结论

(1)所提出的二级自动怠速系统能根据各压力信号按照控制规则在一级怠速、二级怠速及恢复工作之间实现功能切换。

(2)具有蓄能器的自动怠速系统能保证液压泵出口和执行器的入口快速建立压力,从而保证执行器对先导操作手柄信号的快速响应。

(3)具有蓄能器的自动怠速系统比没有怠速控制的系统节能36%,具有良好的节能性和操控稳定性。

## 参 考 文 献

- 1 吴伟胜. 液压挖掘机正流量系统泵阀响应特性匹配性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.  
WU Weisheng. Research on pump and valve matching characteristics of excavator positive flow control system [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- 2 陈欠根, 吴伟胜, 刘文国, 等. 挖掘机正流量系统泵控信号的研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2014, 37(6): 645-649.  
CHEN Qian'gen, WU Weisheng, LIU Wenguo, et al. Research on pump control signal of excavator positive control system [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2014, 37(6): 645-649. (in Chinese)
- 3 殷鹏龙, 张军, 焦生杰, 等. 影响负流量液压系统泵流量因素的试验分析[J]. 工程机械, 2012, 43(7): 47-50.  
YIN Penglong, ZHANG Jun, JIAO Shengjie, et al. Test and analysis on influencing factors of pump flow for negative flow hydraulic system [J]. Construction Machinery and Equipment, 2012, 43(7): 47-50. (in Chinese)
- 4 JACKSON R S, CLANTON R R, PFAFF J L. Hydraulic control valve system with electronic load sense control: US 7,089,733 [P]. 2006-08-15.
- 5 黄虎, 陈光柱, 蒋成林. 全液压钻机负载敏感液压系统设计与仿真分析[J]. 液压与气动, 2015(3): 71-74, 79.  
HUANG Hu, CHEN Guangzhu, JIANG Chenglin. The design and simulation of load sensing hydraulic system in fully hydraulic driver drill [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(3): 71-74, 79. (in Chinese)
- 6 LIN T, WANG Q, HU B, et al. Research on the energy regeneration systems for hybrid hydraulic excavators [J]. Automation in Construction, 2010, 19(8): 1016-1026.
- 7 林添良, 叶月影, 刘强. 挖掘机动臂闭式节能驱动系统参数匹配[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 21-26.  
LIN Tianliang, YE Yueying, LIU Qiang. Parameter matching for a closed-loop energy-saving system of excavators [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 21-26. (in Chinese)
- 8 CAIRANO S D, YANAKIEV D, BEMPORAD A, et al. Model predictive idle speed control: design, analysis, and experimental evaluation [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(1): 84-97.
- 9 王庆丰. 油电混合动力挖掘机的关键技术研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 123-129.  
WANG Qingfeng. Research on key technology of oil-electric hybrid excavator [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 123-129. (in Chinese)
- 10 包海涛, 严桃平. 小松挖掘机节能控制系统的分析研究[J]. 矿山机械, 2002, 30(12): 24-26.  
BAO Haitao, YAN Taoping. Analysis and research on energy-saving control system for KOMATSU excavator [J]. Mining & Processing Equipment, 2002, 30(12): 24-26. (in Chinese)
- 11 齐敦建. XE210B型液压挖掘机自动怠速原理及故障排查[J]. 工程机械与维修, 2015(8): 79-81.
- 12 金立生, 赵丁选, 国香恩. 液压挖掘机PID专家节能控制系统[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 1-3.  
JIN Lisheng, ZHAO Dingxuan, GUO Xiang'en. Study on energy-saving control system of PID expert system in hydraulic excavator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 1-3. (in Chinese)
- 13 熊玉龙, 张鹏程, 郭舒. XR220D旋挖钻机自动怠速控制与试验研究[J]. 装备制造技术, 2015(10): 240-241.  
XIONG Yulong, ZHANG Pengcheng, GUO Shu. Automatic idling control and experiment research of XR220D rotary drilling rig [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(10): 240-241. (in Chinese)
- 14 刘荣华. 液压挖掘机功率匹配控制系统研究[J]. 机床与液压, 2015, 43(10): 111-115.  
LIU Ronghua. Research on the power matching control system for the hydraulic excavators [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(10): 111-115. (in Chinese)
- 15 郝鹏. 液压挖掘机动力系统匹配及节能控制研究[D]. 长沙:中南大学, 2008.  
HAO Peng. Research on power match and energy saving control of hydraulic excavator driving system [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)
- 16 金纯, 郑舒阳, 田海永. 电传车辆反拖系统设计与分层控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 22-27.  
JIN Chun, ZHENG Shuyang, TIAN Haiyong. Anti-drive system design and hierarchy control strategy of electric drive vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 22-27. (in Chinese)
- 17 来晓靓, 管成, 肖扬, 等. 并联油液型混合动力挖掘机发动机转速控制方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 14-20.  
LAI Xiaoliang, GUAN Cheng, XIAO Yang, et al. Engine speed control method of parallel hydraulic hybrid excavator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 14-20. (in Chinese)
- 18 CZARNIGOWSKI J. A neural network model-based observer for idle speed control of ignition in SI engine [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(1): 1-7.
- 19 HROVAT D, SUN J. Models and control methodologies for IC engine idle speed control design [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(8): 1093-1100.
- 20 杨钢, 仇艳凯, 李宝仁, 等. 考虑进口特性的蓄能器吸收压力脉动动态特性研究[J]. 液压与气动, 2012(4): 13-17.  
YANG Gang, QIU Yankai, LI Baoren, et al. Research on dynamic characteristics of the accumulator absorbing pressure pulsation with considering its inlet pipe characteristics [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2012(4): 13-17. (in Chinese)