

液压混合动力挖掘机回转装置控制方式的研究

于安才^{1,2}, 姜继海^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院, 150080, 哈尔滨; 2. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 310027, 杭州)

摘要: 为了降低挖掘机的燃油消耗, 提高整机作业效率, 提出了一种基于液压混合动力技术的挖掘机动力系统节能方案. 该方案采用液压泵/马达独立驱动回转装置, 可保证发动机工作于最佳燃油工作区, 同时结合挖掘机回转装置的作业工况, 通过分析液压混合动力系统的特点, 对回转装置的控制方式进行了设计. 针对回转系统参数的不确定性, 设计了智能比例-积分-微分(PID)的分段变结构控制器, 并通过仿真和模拟试验平台验证了控制器的有效性和适用性. 研究表明, 智能PID转矩控制方式更适合于回转装置的作业要求, 相对于转速控制方式, 系统响应速度快, 回转装置运动控制平稳, 能量回收率高, 达到了理想的控制效果.

关键词: 挖掘机; 液压混合动力; 转矩控制; 能量回收

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)07-0030-04

Control Strategy for Hydraulic Hybrid Excavator Slewing

YU Ancai^{1,2}, JIANG Jihai^{1,2}

(1. College of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China; 2. The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 31002, China)

Abstract: To reduce the fuel consumption and to improve machine operating efficiency, an energy saving power system technique based on the hydraulic hybrid excavator is proposed. Adopting independently slewing hydraulic pump/motor drivers, the engine works preserve in the optimum area. Combining with the working condition of excavator slewing and the analysis of the characteristic of the hydraulic hybrid system, a control strategy of slewing is designed. As the parameters of slewing system get uncertain, a segment variable structure controller based on the intelligent proportion integral differential (PID) is designed. The simulations show that the method improves system effectiveness and applicability, and the intelligent PID torque control method is more suitable for the operational requirements of slewing, the faster response, smoother slewing motion control and higher energy recovery, thereby the desired control effect is achieved.

Keywords: excavator; hydraulic hybrid; torque control; energy recovery

近年来,随着世界范围内工业技术的发展,能源短缺和环境污染问题日趋严重,工程机械数量大、耗油高、排放差,其节能问题不容忽视^[1]. 节能研究有助于降低工程机械的油耗和系统发热,提高设备的可靠性和工作寿命,在一定程度上节约了设备的制造和维护成本^[2]. 为了进一步提高挖掘机的燃油经济性和作业效率,混合动力技术受到了广泛地关注.

根据储能元件的不同,混合动力分为电动混合动力技术和液压混合动力技术. 相对于电动混合动力技术,液压混合动力技术具有功率密度大的特点^[3-4],因此更适用于中重型挖掘机.

目前,国内外对挖掘机液压混合动力技术的研究较少,本文将液压混合动力系统以并联方式配置到挖掘机中,可保证发动机工作于最佳燃油工作点

收稿日期: 2010-11-15. 作者简介: 于安才(1978—),男,博士生;姜继海(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875054);浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-2008003).

网络出版时间: 2011-03-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcs/detail/61.1069.T.20110325.1016.003.html>

或工作区. 回转装置由单泵驱动,利用回转液压泵/马达和新型减速机来减少回转装置的能量损失,存储回转制动过程的惯性能. 本文根据挖掘机回转装置的作业特点,提出了液压再生制动策略,在确保安全制动的同时,高效地回收挖掘机回转装置的惯性能. 针对回转系统的参数摄动和系统的不确定性,设计了回转装置的控制方式,通过对新型回转装置的仿真和模拟试验研究表明,转矩控制方式有利于制动的平稳和制动能量的回收,为液压挖掘机新型节能技术的开发奠定了基础.

1 系统工作原理

液压混合动力挖掘机(见图 1)由发动机、变量泵、液压泵/马达、液压蓄能器、减速器、减压阀等构成. 发动机驱动变量泵为其他执行机构提供油源,液压泵/马达通过变量泵以并联方式配置在发动机一侧,通过回转液压泵/马达和减速机来驱动回转装置. 液压蓄能器置于液压泵/马达与回转液压泵/马达之间,吸收发动机多余功率和回转装置的惯性能,同时通过减压阀为液压泵/马达的变量机构(变量油缸和电液伺服阀)提供稳定的控制油源. 当回转装置回转时,并联在发动机一侧的液压泵马达工作于泵工况,为回转装置提供稳定的动力油源. 驾驶员对回转速度的控制是通过改变回转驱动液压泵/马达的排量来实现的,液压泵/马达排量变化的同时也相应的改变了驱动力矩的大小,从而改变了回转系统的速度. 在回转制动时,换向阀 1 关闭,换向阀 2 开通,驱动液压泵/马达工作于泵工况,在安全制动回转装置的同时,将回转惯性能转换为液压能存储于液压蓄能器中. 在非回转工况时,并联在发动机一侧的液压泵/马达根据整机的负荷情况,吸收和补偿发动机的输出功率与负荷功率的差值,不仅达到了负荷平均化的目的,而且保证了发动机工作于最佳燃油工

作点或工作区.

传统挖掘机回转装置的驱动由发动机、液压泵提供,通过控制阀组、液压马达和减速器传递到挖掘机的上部转台,通过缓冲阀、溢流阀等元件来制动,但存在着能耗大和系统发热的问题^[1]. 在液压混合动力挖掘机系统中,驱动与制动功能由双向变量液压泵/马达来完成^[5],驾驶员对速度的要求是通过控制策略来实现的,即控制系统根据预先设定的参数和转速命令进行控制,然后对车辆的工况进行判断,选择不同的控制策略来实现驱动与制动功能. 液压混合动力挖掘机的制动转矩分为:①回转装置液压泵/马达提供的液压再生制动转矩;②制动器提供的摩擦制动转矩. 由于液压再生制动的功率密度较大,因此可单独提供全部的回转制动转矩,而且制动器只有在紧急制动或者液压再生制动失效时才能启用.

2 回转装置的控制方式

2.1 转矩控制

在回转装置的驱动和制动过程中,整机控制器根据回转驱动手柄的幅度、速度以及加速度来计算系统的所需转矩,对液压泵/马达进行转矩控制,进而控制回转装置的转速. 在制动过程中,对液压泵/马达采用转矩控制方法,当需求转矩超过液压泵/马达所能提供的最大转矩时,液压泵/马达和制动器协调工作,共同制动回转装置. 在恒压系统中,液压泵/马达的斜盘摆角与转矩之间是线性关系^[6],所以可以利用斜盘摆角来实现转矩控制. 由于液压泵/马达具有较高的动态响应,因此无需采用转矩传感器即可实现转矩的开环控制. 由于挖掘机频繁地做往复运动,负载变化大,同时斜盘摆角还受到油温、转矩和速度的影响,因此必须通过斜盘摆角(控制油缸活塞位移)反馈所形成的转矩闭环控制系统,来改善系统的稳定性和动态特性.

2.2 转速控制

整机控制器根据回转驱动手柄的幅度、速度以及加速度来计算需求的转速,对液压泵/马达进行转速控制,并直接控制回转装置的速度. 在制动过程中,通过对液压泵/马达转速的控制方式可直接控制回转速度;当液压泵/马达无法达到目标制动速度时,制动器启动,提供部分制动转矩,再由整机控制器控制液压泵/马达的转速,以达到目标制动转速的要求. 控制系统通过转速传感器反馈的转速信号与期望转速信号的偏差信号,来控制液压伺服阀的动

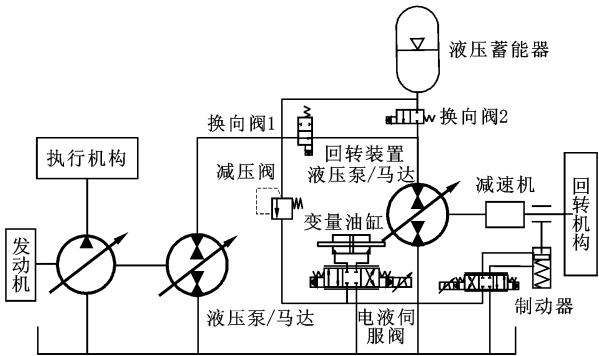


图 1 液压混合动力挖掘机回转装置原理图

作^[6],直到转速值等于期望值为止. 变量控制油缸和伺服阀组成的系统具有典型的积分环节和延迟环节,通过斜盘摆角(控制油缸活塞位移)反馈所形成的内部闭环控制系统,可以将系统的积分特性转变为比例延迟特性,进而改善控制系统的稳定性和动态特性.

3 控制算法设计

针对液压挖掘机回转装置的非线性和不确定性等因素,对液压泵/马达采用智能比例-积分-微分(PID)的控制方法来进行分段变结构的控制,从而达到理想的控制效果.

通过设置最大误差阈值 e_{m1} 及最小误差阈值 e_{m2} ,将系统误差绝对值 $|e(k)|$ 分为大、中、小三档^[7].

规则1 若 $|e(k)| > e_{m1}$,则控制电压 $u(k) = \pm u_{max}$,说明误差过大,相应的控制电压也最大.

规则2 若 $e(k)\Delta e(k) > 0$,或 $\Delta e(k) = 0$ 、 $e(k) \neq 0$,说明 $|e(k)|$ 朝增大的方向变化,或误差为某个常数.

当 $e_{m1} > |e(k)| > e_{m2}$ 时,说明误差也较大,可考虑由控制器实施较强的控制作用,使 $|e(k)|$ 朝减小的方向变化,并迅速减小控制电压误差的绝对值,即

$$u(k) = u(k-1) + Mk_0e(k) + k_1e(k-1) + k_2e(k-2)$$

当 $|e(k)| < e_{m2}$ 时,说明尽管误差绝对值朝增大的方向变化,但 $|e(k)|$ 本身并不是很大,可考虑控制器实施一般的控制作用,扭转误差的变化趋势,使 $|e(k)|$ 朝减小的方向变化,即

$$u(k) = u(k-1) + k_0e(k) + k_1e(k-1) + k_2e(k-2)$$

规则3 若 $e(k)\Delta e(k) < 0$,说明系统输出正趋近给定值或者已达到平衡状态,可考虑控制器减少控制量或控制器输出不变. 当 $e_{m1} > |e(k)| > e_{m2}$ 时,则

$$u(k) = u(k-1) + k_0e(k) - k_0e(k-1)$$

当 $|e(k)| < e_{m2}$ 时,则

$$u(k) = u(k-1) + Nk_0e(k) - k_0e(k-1)$$

上述式中: M 、 N 为可调系数, $0 < N < 1$, $M > 1$; k_0 、 k_1 、 k_2 为控制系数.

规则4 若 $e(k)\Delta e(k) = 0$, $e(k) = 0$,则 $u(k) = u(k-1)$. 显然,PID 算法在本质上是非线性的. 规则1、4 使系统具有快速性和稳定性,规则2、3 则使PID 调节具有变参数调节的自适应特性.

4 仿真研究

如图1所示,为研究系统控制方式的有效性,建立的状态方程^[6]为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -B/J \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ k/J \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J \end{bmatrix} f \\ y &= x_1 \end{aligned} \right\} \tag{1}$$

$$k = \frac{K_v D_{max} p}{A_g X_{max}}; J = J_{p,m} + m_i l_i$$
$$f = \frac{0.6 \times 5\,000^{4/3}}{i_r(z_2/z_1)}$$

式中: D_{max} 为液压泵/马达油的最大排量; K_v 为电液伺服阀流量增益; X_{max} 为变量油缸的最大位移; $J_{p,m}$ 为等效转动惯量; B 为阻尼系数; A_g 为变量油缸活塞的有效作用面积.

以 WY40 液压挖掘机的回转机方案为实例,原始参数为 $i_1 = 28$, $i_2 = 86/12 = 7.167$, $i_0 = i_1 i_2 = 200.676$, $J = 414\,700\text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $J_0 = 236\,500\text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

为了比较PID 和智能PID 控制,系统的各主要参数的标称值如表1所示. 代入 WY40 原始参数,将转动惯量折算到回转马达传动轴处,再分别采用PID 控制方法和智能PID 控制方法对回转机构进行实际作业工况的仿真研究,仿真结果见图2. 从图中可以看出,采用智能PID 控制显著提高了系统的响应速度,明显降低了超调量,缩短了稳定时间,从而改善了系统的控制性能.

表1 系统各主要参数的标称值

参数	标称值	参数	标称值
$D_{max}/\text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1}$	$6.369\,4 \times 10^{-6}$	$J_{p,m}/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.04
$K_v/\text{m}^3 \cdot \text{A} \cdot \text{s}^{-1}$	$3.333\,3 \times 10^{-6}$	$B/\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$	0.15
X_{max}/m	0.014	A_g/m^2	1.849×10^{-3}

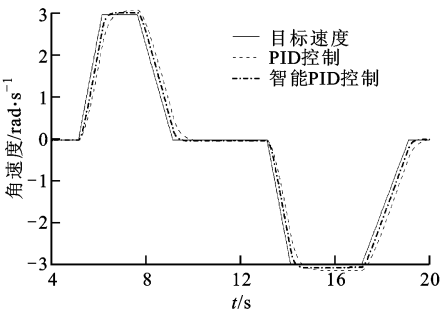


图2 回转装置速度控制性能曲线

5 试验研究

5.1 混合动力挖掘机回转装置模拟试验系统

液压混合动力挖掘机回转装置模拟试验系统如图 3 所示. 发动机恒转速控制驱动变量泵为系统提供动力油源, 液压泵/马达通过减速机驱动惯性飞轮组, 惯性飞轮组通过不同的飞轮盘组合模拟挖掘机回转装置的载荷变化, 磁粉制动测功机提供回转装置作业工况下的阻力转矩, 同时将飞轮组的转速及功率信号传递给中央控制器. 中央控制器输出的模拟控制信号经放大器放大后, 通过电液伺服阀和变量油缸来控制液压泵/马达的转速. 将上述控制策略和控制方法利用 C++Builder 语言进行编程, 并植入到液压挖掘机回转装置的控制系统中, 选择阻力转矩为 10 N·m, 进行非紧急制动的制动能回收试验, 并对试验结果进行了对比分析.

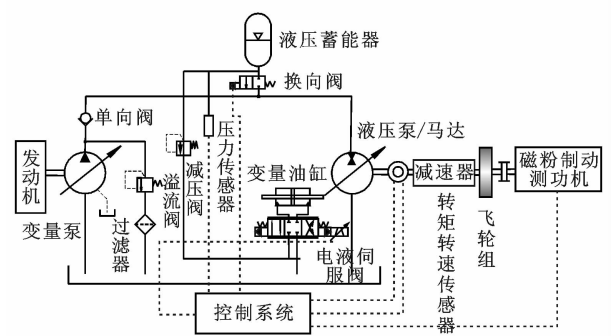


图 3 回转装置模拟试验系统

5.2 试验结果

回转装置空斗制动和满斗制动的试验曲线分别如图 4~图 7 所示. 其中, 图 4、图 5 分别是在转速(v)控制及转矩控制的方式下, 挖掘机回转装置空斗制动的能量回收试验曲线, 图 6、图 7 则分别模拟了转速控制及转矩控制方式下挖掘机回转装置满斗制动的能量回收试验曲线.

采用下式计算制动能量回收率

$$\epsilon = \frac{E_{acc}}{E_r} = \frac{(p_1 V_1^n / (n - 1)) (V^{1-n} - V_1^{1-n})}{1/2 (J (\omega_2^2 - \omega_1^2))} \quad (2)$$

式中: E_{acc} 为液压蓄能器回收的能量; E_r 为回转制动时回转装置的惯性能; p_1 为液压蓄能器最低工作压力; V_1 为液压蓄能器内气体在最低压力下的体积; n 为气体的多变过程指数; V 为蓄能器容积; ω_1 为制动前回转装置转速; ω_2 为制动后的回转装置转速.

根据试验结果, 由式(2)计算得出转矩控制的制动能量回收率分别为 40.23%(空斗制动)和 58.61%(满斗制动); 转速控制的能量回收率只有 29.13%

和 53.26%. 由模拟试验结果可知: 采用转速控制时, 系统响应稍慢, 制动过程持续时间略长, 且制动能量回收率低; 采用转矩控制时, 系统响应稍快, 制动

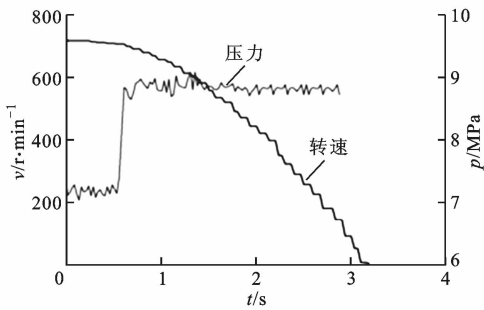


图 4 空斗制动转速控制

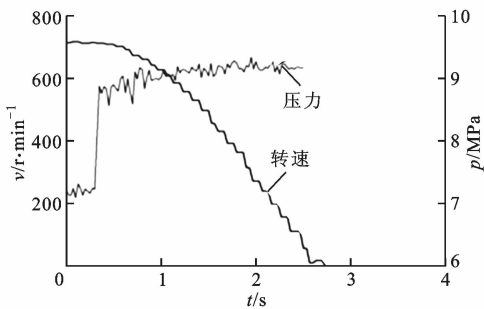


图 5 空斗制动转矩控制

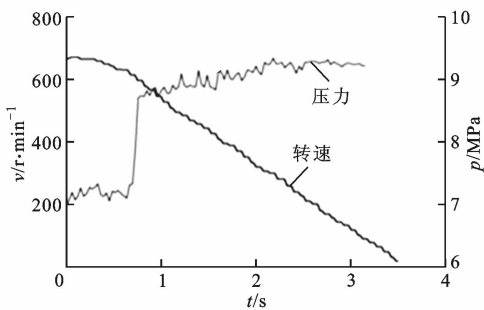


图 6 满斗制动转速控制

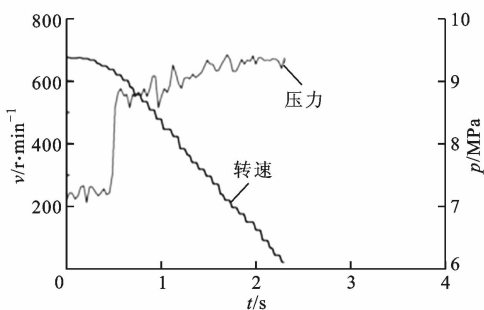


图 7 满斗制动转矩控制

转矩平稳, 制动过程持续时间短, 且制动能量回收率

高. 因此, 智能 PID 控制方法能够达到理想的控制效果.

6 结 论

本文将液压混合动力系统以并联方式植入挖掘机中, 采用回转装置单泵独立驱动方式来调整发动机的负荷状态, 从而可保证发动机工作于最佳燃油工作点或工作区. 利用液压泵/马达和新型减速机减少了回转装置的能量损失, 以及存储回转制动过程中的惯性能. 根据挖掘机回转装置的作业特点, 本文提出了采用回转装置的控制方式, 针对回转系统的参数摄动和系统的不确定性, 采用智能 PID 控制理论设计了系统的控制器. 仿真及模拟试验结果表明, 转矩控制方式更适合回转装置的快速启动和制动工况, 其响应速度快, 控制平稳, 不仅提高了挖掘机的操控性能, 而且高效地回收了回转装置的惯性能量.

参考文献:

- [1] 张彦廷, 王庆丰, 肖清. 混合动力液压挖掘机液压马达能量回收的仿真及试验 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 218-223.
- ZHANG Yanting, WANG Qingfeng, XIAO Qing. Simulation and experimental research on energy regeneration with hydraulic motor for hybrid drive excavator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 218-223.
- [2] 王庆丰, 张彦廷, 肖清. 混合动力工程机械节能效果评价及液压系统节能的仿真研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 135-139.

WANG Qingfeng, ZHANG Yanting, XIAO Qing. Evaluation for energy saving effect and simulation research on energy saving of hydraulic system in hybrid construction machinery [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 135-139.

- [3] 魏英俊. 新型液压驱动混合动力运动型多用途车的研究 [J]. 中国机械工程, 2006, 17 (15): 1645-1648.
- WEI Yingjun. Study on a new type of hydraulic sport utility vehicle [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(15): 1645-1648.
- [4] 王昕, 姜继海. 轮边驱动液压混合动力车辆再生制动控制策略 [J]. 吉林大学学报, 2009, 39(6): 1544-1549.
- WANG Xin, JIANG Jihai. Regenerative braking control strategy for wheel drive hydraulic hybrid vehicle [J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(6): 1544-1549.
- [5] 韩文. 新型电控液驱车关键技术的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [6] 郭晓林. 履带车辆综合传动装置动态试验技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2005.
- [7] 姜继海, 韩永刚, 王德海, 等. 二次调节静液驱动系统的智能 PID 控制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 2 (9): 36-38.
- JIANG Jihai, HAN Yonggang, WANG Dehai, et al. The intelligent PID control in hydrostatic drive system with secondary regulation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 2(9): 36-38.

(编辑 管咏梅)