

「建模仿真」

基于模糊PID控制的混合动力装载机铲斗能量回收装置研究

文/秦皇岛市第一医院 刘一存 张 超
燕山大学机械工程学院 贾婉君 李文雷

工程机械是能源消耗的大户，同时其排放物对大气造成大量污染。装载机在铲斗回收、下放过程中存在大量的势能，大部分转化的油液热能，油液发热造成泄漏量增加，效率降低。为降低消耗，减少排放，在现有的混合动力装载机的基础上设计能量回收装置。通过使用变量马达、发电动机、整流器等装置将势能转化为电能。对普通能量回收系统出现的压力振荡，铲斗下放会出现剧烈震动等现象，使用模糊PID控制器、压力传感器形成闭环控制有效防止油路出现压力振荡，同时提高了回路的动态特性。经过理论分析与AMESim建模仿真研究，所设计的能量回收系统响应好，能量回收率高。

装载机是工程机械的主要机型，由于机动灵活、操作简单，工况适应性强，在道路、建筑、矿山、城市建设、救援抢险的领域得到广泛的应用。由于装载机发动机排量大、功率高以及工况复杂等因素消耗大量的资源，同时尾气排放对环境造成巨大压力。近年来，由于环境保护、节约资源等意识的加强，多国政府出台了相关政策法规，强制规定机动车辆的排放标准。降低能源消耗，减小尾气排放以及提高能量利用率是装载机不断发展的几项指标。

2003年日本研制了世界上第一台混合动力装载机，开创了混合动力工程机械研发的先河，随后卡特彼勒、沃尔沃、力士乐以及国内柳工、徐工等企业陆续推出了混合动力装载机。混合动力是指通过不同动力源的联合工作，使其充分发挥各自的优越性以提高能量的利用率。在液压工程机械领域，混合动力是指燃油发动机和电动机的联合驱动，主要有串联式和并联式两种形式，混合动力的出现降低了能源消耗。目前，对装载机的节能技术，混合动力系统进行了大量的研究与

实践，吉林大学赵丁选等提出了重度串联式油电混合动力方案。针对该方案提出模糊逻辑控制策略，比传统装载机节油约16.6%，改善了燃油经济性。柳工推出CLG862-HYBRID混合动力装载机采用并联混合动力系统方案，储能元器件为超级电容。该款混合动力装载机的ISG电动机可以根据负载调节输出转矩，在同等工况下，与传统装载机相比节约燃油10.5%，但是对于装载机等能量回收的研究较少，并且主要集中在制动系统。石荣玲等分析了低速作业工况下轮式装载机的能耗损失和混合动力装载机节能潜力，分析表明充分回收制动动能和整机下长坡的重物势能有利于提高装载机的节能指标。兰昊使用模糊逻辑控制策略完成对制动能量的回收，且采用了能量回收系统方案之后，进一步改善了燃油经济性，该方案相比传统装载机节能15.65%。装载机在工作循环中主要有行走系统和铲斗液压系统，因此，对铲斗回放的能量进行回收，转化为电能存储到超级电容中供电动机使用，可以提高能量循环利用率。

能量回收方案与建模

在常规的模糊控制系统中,通常使用二维模糊控制器,这种模糊控制器的输入变量是系统偏差与偏差变化率,其可以获得很好的动态特性,但是稳态特性较差,会出现小幅振荡的现象,而PID控制器具有很好的稳态控制效果,原理简单,使用方便、适应性强、鲁棒性好,其控制品质对被控对象的变化不太敏感,同时具有较高的性价比,非常适用于环境恶劣的工业生产现场。因此把模糊控制器与PID控制器结合起来组成模糊PID控制器,使得系统的动态特性与稳态特性都能达到满意的效果。

在混合动力装载机电液系统的基础上加以改进,在铲斗液压缸的无杆腔加装压力传感器、模糊PID控制器、二位三通电磁换向阀、变量马达、发电电动机、整流器、蓄电池,回收装置如图1。在铲斗回放时,二位三通电磁换向阀左位接入回路,油液经过阀体进入变量马达,马达将压力能转换为机械能,带动发电电动机旋转,发电电动机将机械能转化为电能经过整流器存储在蓄电池中,在工作时电动机同发动机共同驱动液压泵。每次铲斗回收负载可能会出现一定程度的偏差,为了防止在能量回收回路中出现压力冲击以及稳定腔压力,在回路上设置压力传感器,传感器的出口与模糊PID控制器连接,控制变量马达的排量。在负载作用下,当压力急剧上升时,传感器输出信号经过模糊PID控制器整定增大马达排量,增加变量马达的输出转矩,带动电动机克服惯性及阻力加速旋转,所需流量升高,压力下降。当压力过低时,系统自动减小马达排量,所需流量下降,压力逐

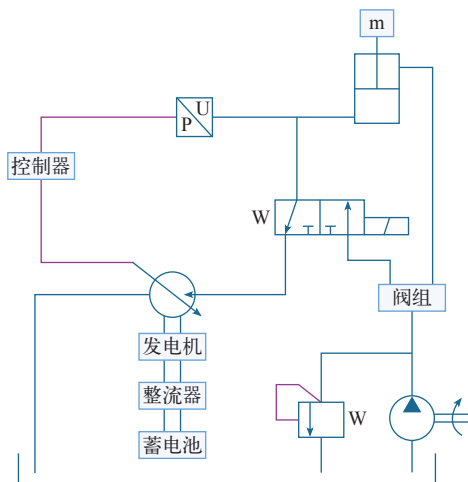


图1 能量回收装置原理示意图

步升高,使系统压力平稳。其控制策略如图2。

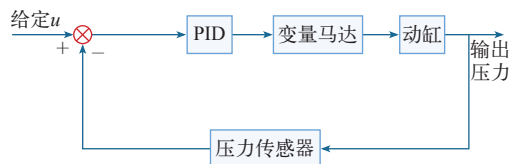


图2 能量回收控制策略原理图

在系统运行中假定油温和体积弹性模量为常数,液压缸内、外泄漏为层流流动,则:

流入液压缸的流量 q_1 为

$$q_1 = A_p \frac{dx_p}{dt} + C_{ip}(p_1 - p_2) + C_{ep}p_1 + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dp_1}{dt} \quad (1)$$

液压缸流出的流量 q_2 为

$$q_2 = A_p \frac{dx_p}{dt} + C_{ip}(p_1 - p_2) - C_{ep}p_1 - \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} \quad (2)$$

式中, A_p 为液压缸活塞面积 (m^2); x_p 为活塞位移 (m); C_{ip} 为液压缸内泄系数 ($m^3/(s \cdot Pa)$); β_e 为油液体积模量 (Pa); V_1 为液压缸进油侧体积 (m^3); V_2 为液压缸回油侧体积 (m^3)。

液压缸与负载的力平衡方程为

$$F = (p_2 A_2 - p_1 A_1) - m \frac{dx_s^2}{dt} + B_p \frac{dx_s}{dt} \quad (3)$$

式中, m 为活塞及负载折算到活塞上的总质量 (kg); B_p 为活塞及负载的粘性阻尼系数 ($N \cdot m/s$)。

液压马达的流量为

$$Q_m = C_{im}p_2 + C_{em}p_2 + D_m \frac{d\theta_m}{dt} + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_2}{dt} \quad (4)$$

式中, Q_m 为液压马达的流入流量 (L/min); C_{im} 为液压马达的内泄漏系数 ($m^3/(s \cdot Pa)$); C_{em} 为液压马达的外泄漏系数 ($m^3/(s \cdot Pa)$); θ_m 为液压马达的转角 (rad); D_m 为液压马达的排量 (mL/r)。

液压马达和负载的力矩平衡方程为

$$D_m p_2 = J_t \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + G\theta_m + T_L \quad (5)$$

式中, J_t 为液压马达和负载的总惯量 ($kg \cdot m^2$); B_m 为黏性阻尼系数 ($N \cdot m/s$); G 为负载弹簧刚度 (N/mm); T_L 为作用在液压马达轴上的任意外负载力矩 ($N \cdot m$)。

PID控制在一段连续时间域内的控制律可用下式表示

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

式中, $r(t)$ 为系统设定值; $u(t)$ 为控制器的输出变量; K_p 为控制器的比例增益系数; K_i 为控制器的积分增益系数; K_d 为控制器的微分增益系数; $e(t)$ 为被控对象实际值与预定值的相对偏差。

另外, $u(t)$ 也可以写成如下形式

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

式中, K 为控制器的比例增益系数; T_i 为控制器的积分时间常数; T_d 为控制器的微分时间常数。

模糊PID建立误差 e 、误差变化率 ec 同PID增量参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 相对应的模糊规则进行推理来实现对参数的调节作用。模糊算法不破坏原有常规PID的控制效果, 仅依据系统的跟踪误差对PID参数进行增量调节(增量可正可负)。模糊PID控制器结构如图3。调整3个参数要遵循 K_p 、 K_i 、 K_d 原则和相应的模糊规则表。

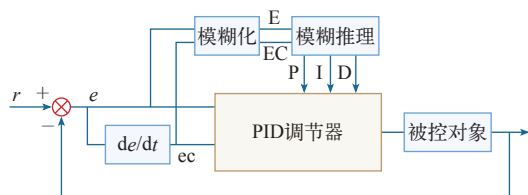


图3 模糊PID结构图

根据理论分析结合AMESim强大的界面显示能力, 对系统进行相应的简化, 在不影响本质原理的基础上建立系统的模型。在机械库中选取负载

和驱动电动机, 在信号库中选取信号以及函数, 创建模糊PID超级元件, 在液压库中选取变量马达、液压泵、压力传感器、溢流阀等原件。建立的能量回收系统模型如图4。模型主要参数: 液压缸活塞直径140 mm, 活塞杆直径为90 mm, 液压缸行程为0.8 m, 供油压力为16 MPa, 油液密度为880 kg/m³阀额定流量为100 L/min, 阀额定电流为40 mA, 阀频率为80 Hz, 泵源流量为60 L/min, 负载重量为1 000 kg。

仿真结果及分析

铲斗回放时重力做正功, 因此有杆腔压力较低, 只需保证不产生局部负压。使用AMESim建模仿真结果如下。

由图5和图6可知在没有使用模糊PID控制器的能量回收系统中, 有杆腔压力较高, 增加了动力源输出的功率, 压力出现一定的波动, 达到稳定状态时间长。加装了模糊PID控制器后, 虽然出现一定的超调, 但在较短的时间内达到稳定, 并且稳态压力较低, 节约了动力源的输出能量。在铲斗工作状态切换过程, 无杆腔会出现压力超调, 使用模糊PID校正后仅在0.1 s出现波峰, 随后压力下降于0.2 s达到稳态平衡, 而未使用模糊PID控制器的系统出现大范围连续振荡, 对液压元件造成冲击影响能量回收效率和使用寿命。对比图9和图10, 未使用模糊PID控制器时由于压力振荡引起发

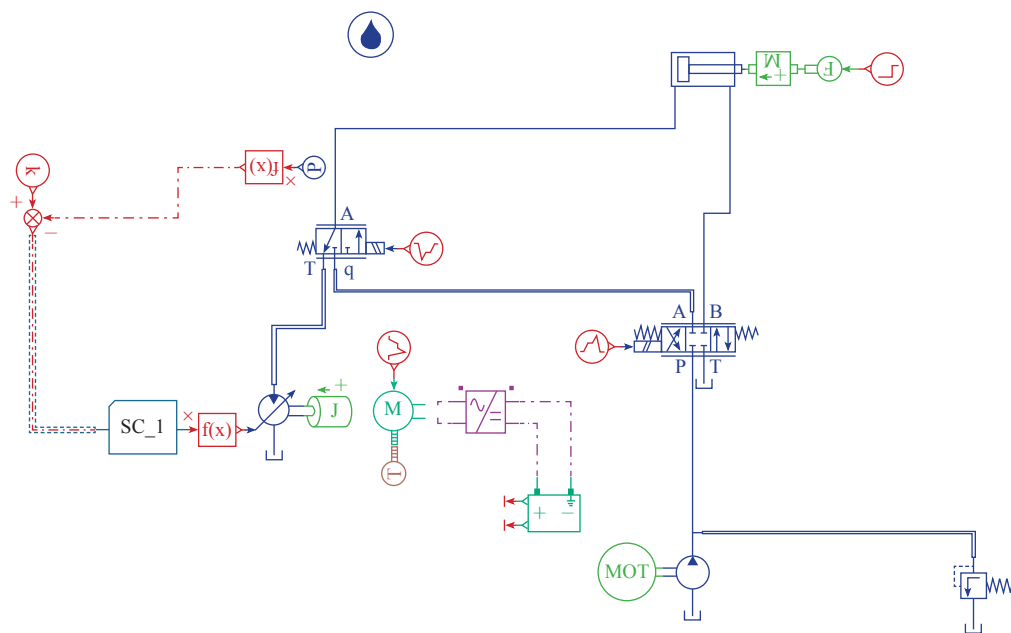
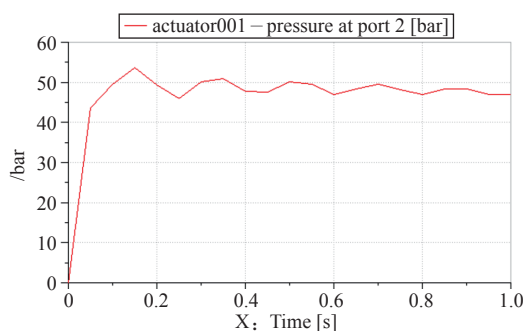


图4 能量回收系统模型



注: 1bar=0.1 MPa。

图5 未校正的有杆腔压力曲线

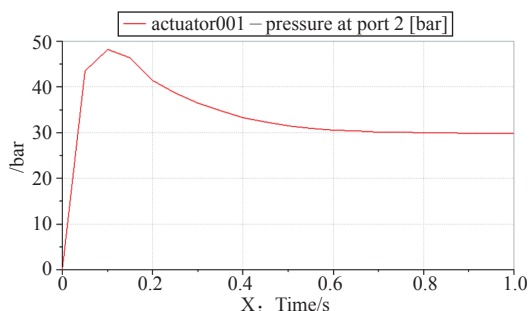


图6 校正的有杆腔压力曲线

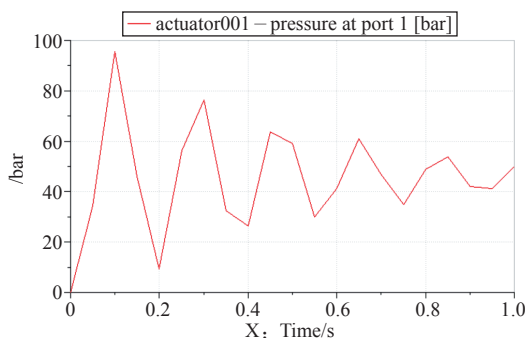


图7 未校正的无杆腔压力曲线

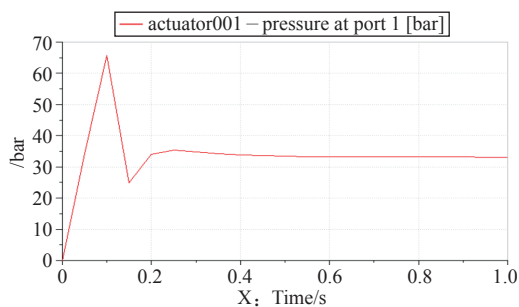


图8 校正的无杆腔压力曲线

电动机转速波动, 趋于失控状态, 在使用模糊PID校正后, 回收压力快速趋于平稳, 变量马达的输入转矩与负载平衡, 发电机具有稳定的转速。从理论分析与仿真结果达到回收系统的管路等压力损失大约为2 MPa, 液压马达、发电机和蓄电

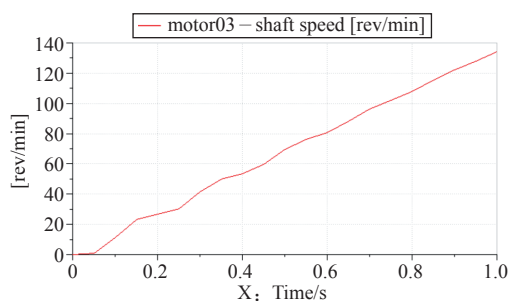


图9 未校正的发电机转速曲线

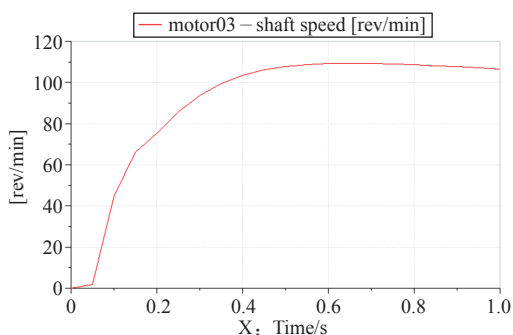


图10 校正的发电机转速曲线

池的能量转化效率分别取0.75、0.85和0.85, 系统的能量回收率可由下式计算

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4$$

式中, η_1 为液压马达效率; η_2 为发电机效率; η_3 为蓄电池效率; η_4 为阀、管路效率, $\eta_4 = 1 - (\Delta p q / p_s q_s)$, $\eta_4 = 0.72$ 。

通过对仿真的结果分析可知, 使用PID校正后系统具有较高的快速性和稳定性, 能量回收率为0.39, 满足预期目标。

结束语

针对混合动力装载机铲斗及动臂下降过程中势能损耗, 从电液系统工作原理出发设计一种能量回收系统, 采用容积调速技术效率高, 减小系统发热, 为解决普通系统中出现的压力波动、动臂下降速度波动剧烈, 能量回收系统采用闭环控制结合模糊PID算法, 控制变量马达的排量跟随系统压力变化, 消除压力脉动, 使系统稳定工作, 提高能量回收效率, 回收效率达到了39%。理论分析与系统建模仿真证明该系统是有效的、可行的, 但是仿真和理论毕竟具有一定的局限性, 是对真实系统的简化, 具体效果可通过后续样机实验验证。EA

(收稿日期: 2017.05.30)

(编辑: 朱金凤)