

# 电液流量匹配装载机转向系统特性分析

闫旭冬, 权 龙, 杨 敬

(太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 太原 030024)

**摘 要:** 为降低小型装载机负荷传感液压转向系统在流量方面的能量损失, 提出用伺服电机独立驱动定量泵的电液流量匹配转向控制方法。该文首先在 SimulationX 中建立了装载机整机联合仿真模型, 对采用负荷传感转向系统的装载机在原地转向工况下进行仿真。构建了装载机试验测试系统, 通过对比仿真与试验结果, 验证了仿真模型的准确性。进一步将电液流量匹配转向方法应运于此仿真模型。维持与负荷传感系统相同转向特性的条件下, 该系统在低速空载工况下使液压泵能量消耗相对负荷传感系统降低 36%, 高速空载为 37%, 中速正载为 39%, 中速偏载为 28%, 电液流量系统平均降低了转向过程中泵输出能耗约 30%。该文提出的研究方法对装载机转向节能研究提供了参考。

**关键词:** 装载机; 液压; 模型; 流量匹配; 电液转向; 能量消耗

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.011

中图分类号: U4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0071-08

闫旭冬, 权 龙, 杨 敬. 电液流量匹配装载机转向系统特性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 71—78.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.011 http://www.tcsae.org

Yan Xudong, Quan Long, Yang Jing. Analysis on steering characteristics of wheel loader based on electric-hydraulic flow matching principle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 71—78. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.011 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

装载机作为工程建设中用量最大的机种之一, 因其载荷变化频繁, 存在油耗高的问题。装载机工作过程中转向动作频次高, 而国产装载机普遍使用的定量泵转向系统存在较大的能耗, 成为降低能耗重点研究方向。

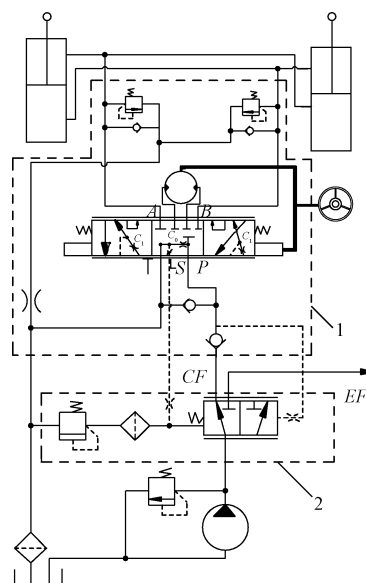
Daher N A 等<sup>[1-3]</sup>将变排量线控闭式回路用于装载机转向系统。研究表明, 变排量泵控闭式转向系统较负荷传感系统降低燃油消耗达 14.5%。基于对被广泛使用的同轴流量放大转向系统<sup>[4-7]</sup>和负荷传感转向系统<sup>[8-11]</sup>的相关研究, 邓斌等、蔡政军<sup>[12-14]</sup>将负荷敏感变量柱塞泵用于转向系统, 泵的排量可随转向负载变化进行自动调节, 测试结果表明, 改进后系统的能耗和油温都显著下降。蒲显坤等<sup>[15]</sup>对采用变转速闭式泵控缸原理的转向系统作了仿真分析, 结果表明, 该系统可完全消除节流损失。谭兆钧等<sup>[16]</sup>对变频电机驱动定量泵阀控转向系统开展了研究, 试验与仿真结果表明, 所设计的鲁棒控制器可使变转速泵输出与转向需求相应的流量, 较采用负载敏感泵的系统能耗进一步降低。

上述最为节能的闭式转向回路中变量泵的控制难度大, 系统复杂且成本高, 因此提出电液流量匹配与负荷传感并联的冗余转向回路控制方法。为分析该系统的节能情

况, 本文首先建立了装载机联合仿真模型, 然后分别对负荷传感与流量匹配系统进行仿真分析, 其中, 仿真模型的准确性通过试验数据进行了比对验证, 以期降低装载机转向过程能量消耗提供参考。

## 1 负荷传感液压转向系统

图 1 所示为小型装载机负荷传感转向系统原理图。



1. 负荷传感全液压转向器 2. 优先阀

1. Load sensing hydraulic steering gear 2. Priority valve

注: CF、EF 分别为转向油口及工作油口; LS 为控制油口; P、T 分别为进油口及回油口; A、B 为负载口; C<sub>0</sub>、C<sub>1</sub> 为节流口。

Note: CF and EF represent steering port and working port; LS represent control port; P and T represent inlet port and outlet port; A and B represent actuator port; C<sub>0</sub> and C<sub>1</sub> represent throttle.

图 1 负荷传感转向系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of load sensing steering system

收稿日期: 2015-07-24 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2014BAF08B06)

作者简介: 闫旭冬, 男, 山西太原, 主要研究方向为电液比例及伺服控制技术。太原 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 030024. Email: 1065297082@qq.com

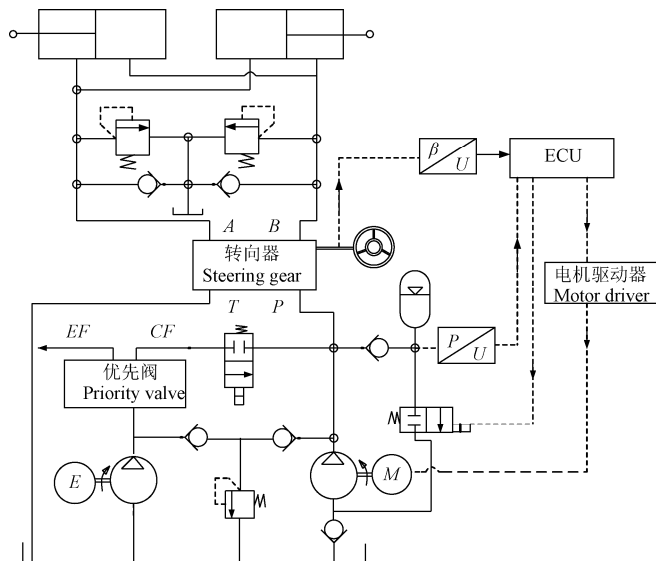
※通信作者: 权 龙, 男, 山西太原, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电液伺服技术及生产过程智能控制。太原 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 030024. Email: quanlong@tyut.edu.cn

图 1 中, 转向系统与工作装置系统共用一个定量液压泵。系统中静态优先阀的功能是将液压泵的输出流量分配给转向系统和工作系统。而转向器与计量马达的功能是确保流入油缸的流量与方向盘转角成正比, 使转向缸位移正比于方向盘转角。

装载机转向时, 由于系统中定量泵排量较大, 其输出流量远大于转向液压缸所需流量, 而多余流量溢流回油箱, 产生较大的溢流损失。以实验室 1.8 T 小型装载机为例, 泵公称排量 50 mL/r, 发动机额定转速 2 400 r/min。经计算, 装载机从中间位置转到极限位置时约需 1.2 L 油液, 若 3 s 内完成上述转向工况, 泵排出约 5 L 油液, 其中 3.8 L 过剩流量都经溢流阀高压流回油箱。此外, 当装载机只有行走动作时, 泵输出流量全部卸荷, 产生较大的中位卸荷损失。

## 2 电液流量匹配转向系统

针对定量泵转向系统能耗高的问题, 提出用伺服电机单独驱动单向定量泵, 使泵输出流量与负载相匹配的开式电液流量匹配方式, 如图 2 所示。通过伺服电机驱动器的控制, 使电机在一定时间内所转圈数与方向盘转角成比例关系: 当方向盘快速转动时, 伺服电机转速提高; 方向盘转动较慢时, 电机转速降低; 方向盘停止转动, 电机也停止转动。系统中转向器不仅用于控制转向液压缸的换向, 还使流向转向缸的流量与方向盘转角之间的比例关系更加准确。原地重载转向等工况需要泵输出较大的功率, 为降低电机装机功率, 回路中增设液压蓄能器, 并将其压力油经控制阀引到转向泵的吸油口, 通过提高转向泵的进口压力来提升其功率。当所需转向功率较小时, 电磁阀自动关闭, 向蓄能器内补充油液。另外通过电磁阀将该控制系统与现有转向负荷传感系统并联, 一旦转向电机出现故障, 系统自动切换到原系统继续运行, 提高了转向安全性。



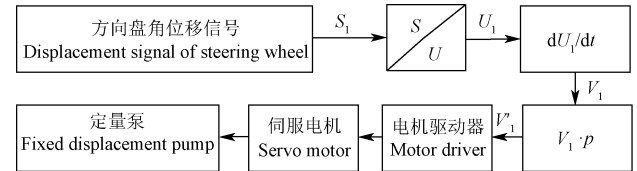
注:  $E$ 、 $M$  分别为发动机及电动机;  $\beta$ 、 $U$  分别为角速度信号与电压信号; ECU 为电控部分。

Note:  $E$  and  $M$  represent engine and motor;  $B$  and  $U$  represent angular velocity and voltage signal; ECU represents electric control part.

图 2 电液流量匹配转向回路原理图

Fig.2 Schematic diagram of steering system based on electric-hydraulic flow matching

开式电液流量匹配系统中, 考虑系统泄漏的基础上, 要求伺服电机驱动定量泵排出相应体积的油液。电机开环控制原理如图 3 所示, 采用绝对式角位移传感器对方向盘的角位移信号  $S_1$  进行采集, 将传感器连续输出的电压信号  $U_1$  进行微分环节处理得到转向速度信号  $V_1$ , 对该速度信号进行 PI 调节后得到控制电压信号  $V_1'$  最终将该信号输入驱动器进而控制伺服电机的转速。



注:  $S_1$ 、 $S$  为方向盘角位移信号;  $U_1$  为传感器连续输出的电压信号;  $V_1$  为速度信号;  $V_1'$  为 PI 调节后的电压信号;  $p$  为比例因子。

Note:  $S_1$  and  $S$  represent displacement signal of steering wheel;  $U_1$  represents continuous output voltage signal of sensor;  $V_1$  represents speed signal;  $V_1'$  represents speed signal adjusted by PI module;  $p$  represents scale factor.

图 3 转向控制系统原理图

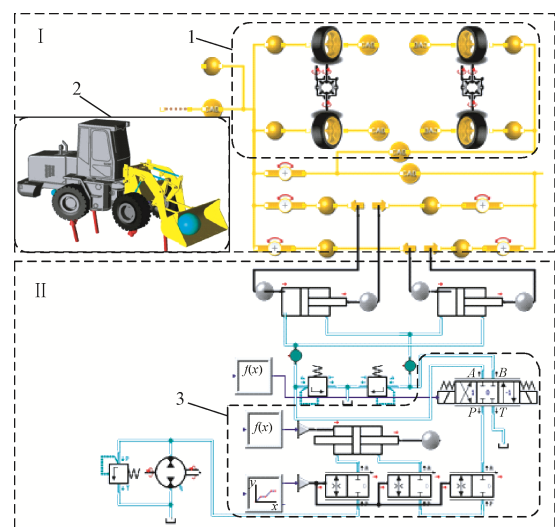
Fig.3 Schematics of control system

## 3 联合仿真分析

为研究电液流量匹配系统能耗情况, 可先期通过建立其联合仿真模型进行理论研究, 但仿真模型的准确度会很大程度上影响研究结果的准确性。由于电液流量匹配转向系统联合仿真模型中除泵控部分, 其他模块都与现有系统相同, 因此, 可先通过建立现有转向系统的联合仿真模型, 将其仿真结果与试验结果进行比较, 从而验证现有转向系统仿真联合仿真模型的准确性。进一步将此仿真模型用于电液流量匹配转向系统。

### 3.1 负荷传感转向系统联合仿真模型

将装载机整机动力学模型与转向系统液压模型通过转向液压缸相耦合, 从而建立了负荷传感转向系统联合仿真模型, 如图 4 所示。



1. 为轮胎动力学模型 2. 整机三维模型 3. 转向器液压模型

1. Kinetic model of tire 2. Three-dimensional geometric model 3. Hydraulic model of steering gear

注:  $f(x)$  为控制函数。

Note:  $f(x)$  represents control function.

图 4 转向系统联合仿真模型

Fig.4 Co-simulation model of steering system

首先使用 Pro/E 软件建立了整机三维模型, 如图 4 中 2 所示。将其导入 SimulationX 仿真软件中, 通过对各部件质量、惯性矩等进行设置进而建立了装载机的动力学模型, 如图 4 中 I 部分。动力学模型主要包括前后车架、铰接机构、差速器模型、轮胎模型、轮辋、加载物料的质量块、前后桥及其驱动行走模块。同时使用该仿真软件建立了负荷传感转向系统液压模型, 如图 4 中 II 部分, 其主要包括定量泵、转向器模型、动作信号输出模块、节流模块、油箱、各溢流阀及转向液压缸。

对实验室镇江液压件厂 BZZ-5-E315C 负载传感全液压转向器拆分, 以期对内部结构进行研究进而建立准确的液压模型。为便于对转向器中阀体、阀套、阀芯上各节流孔数量及孔径大小进行计算, 获到转向过程中阀芯与阀套之间的通流面积随二者相对转角的变化曲线, 本文基于零件的测绘数据, 在 Pro/E 软件中建立其关键零件三维实体模型, 如图 5a 所示。阀芯和阀套之间的通流面积与相对转角的关系曲线可由 SimulationX 软件中 valve edge 模块得到, 模块参数输入窗口如图 5b 所示。

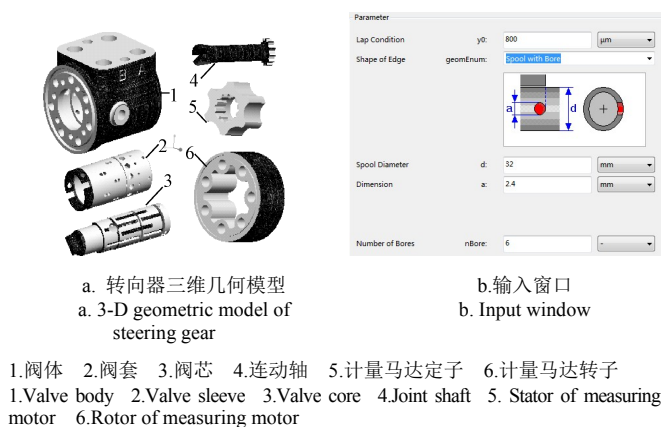


图 5 转向器液压模型  
Fig.5 Hydraulic model of steering gear

对转向系统进行仿真时, 选择仿真能力较高的轮胎模型是常用的加载方式。在轮胎模型研究方面, 危银涛等<sup>[17-19]</sup>指出常用模型的优缺点及发展趋势。郭孔辉等<sup>[20-21]</sup>通过软件仿真与试验, 验证了其提出的统一轮胎模型(UniTire)运算的准确性与稳定性。张志文<sup>[22]</sup>将转向试验过程中测得的液压缸载荷谱数据加载到先导比例溢流阀中, 从而模拟出转向过程中轮胎的阻力大小。徐礼超等<sup>[23-25]</sup>综合应运 nSoft 等软件对试验测得的液压缸油压和位移数据进行处理, 得到转向缸外负载力变化曲线。

SimulationX 中 tire-plane Contact 模块提供了四种轮胎模型, 其中 pacejka 轮胎模型是基于大量试验数据, 由三角函数形式表达的经验轮胎模型。由于该模型精度较高, 在汽车动力学领域被广泛采用, 因此本文选定常用的 Pacejka 模型, 在该模型中对轮胎刚度、轮胎及轮辋尺寸参数、滚动阻力系数、前后轮胎载荷等参数进行设置并进行修正, 以尽可能接近实际参数, 而其他参数设置

为默认值。在相应的 sphere 模块中输入与轮胎连接的传动半轴的各参数, CAD Import 模块输入轮胎的整体质量及初始坐标位置等参数。

### 3.2 仿真结果分析

装载机铰接式转向分为原地及行驶转向, 由于原地转向轮胎所受阻力矩约是行驶转向的 2~3 倍, 因此仿真及试验研究中主要对原地转向过程中转向系统各腔室压力及左侧转向液压缸位移进行对比分析。如图 6 所示, 为负荷传感原理转向过程仿真结果。不同的方向盘转动速度会对转向系统各腔压力及泵消耗能量造成不同影响, 因此分别以高低 2 种转向速度控制装载机原地空载向右转到极限位置后再将其回正进行仿真研究。如图 6a、6b 所示, 分别为低、高转动速率工况下, 负荷传感转向系统各腔压力及活塞位移仿真结果。结果表明: 相对慢速转动方向盘, 快速转动过程中, 泵出口压力显著增大。此外, 随着转向角度的增加, 系统中各腔室压力值呈增大趋势, 图 6a、6b 中压力峰值是由于前车架接近机械限位而产生压力冲击造成的。

另外, 转向负载不同的加载方式会对系统各腔压力及泵能量消耗造成不同影响, 因此以中速转动方向盘, 分别对正载及偏载工况进行仿真研究。其中正载工况: 铲掘沙石 1 000 kg, 物料的重心位于铲斗的中心位置处; 偏载工况: 取 600 kg 的沙石堆放在铲斗的一侧, 使物料的重心偏离铲斗的中心大约 400 mm 处。如图 6c、6d 所示, 分别为正载和偏载工况的仿真结果。结果表明: 泵出口压力值随转向角度的增加而增大, 且转向过程中维持在 5 MPa 左右。

## 4 试验测试

为了对已建立的负荷传感仿真模型的准确性进行验证, 需要对装载机转向系统进行试验测试。通过对比试验与仿真结果, 进而对已建立的模型进行参数修正, 最终建立具有较高仿真能力的联合仿真模型。

在保证不改变原车结构及性能前提下, 对左侧转向液压缸加装 HONTKON 公司 HPS-M1-10-10V 拉线式位移传感器。将 ATOS 公司 E-ATR-7/250/I 10 型压力传感器经三通接头连接在泵出口及 2 个转向液压缸无杆腔油管上。该压力传感器测压范围为 0~25 MPa, 输出 4~20 mA 电流信号, 而数据采集仪输入信号需为电压信号, 因此在传感器输出端并联 500  $\Omega$  电阻, 这样就将电流信号转换为 2~10 V 的电压信号。将测量的位移与压力输出信号经 PCB 接线板转换为电压信号, 进而将其输入亿恒公司 Type MI-7016 型数据采集仪。试验前对所采集的信号进行标定, 将电压信号转化为实际工程单位, 为后续数据处理做准备。最后接通电源, 对试验仪器进行调试。在试验数据采集前左右转动方向盘以消除中位偏差, 试验中保持动臂液压缸与摇臂液压缸的位移不变, 使发动机油门高度基本保持不变。试验中各传感器的安装及数据采集仪等设备照片如图 7 所示。

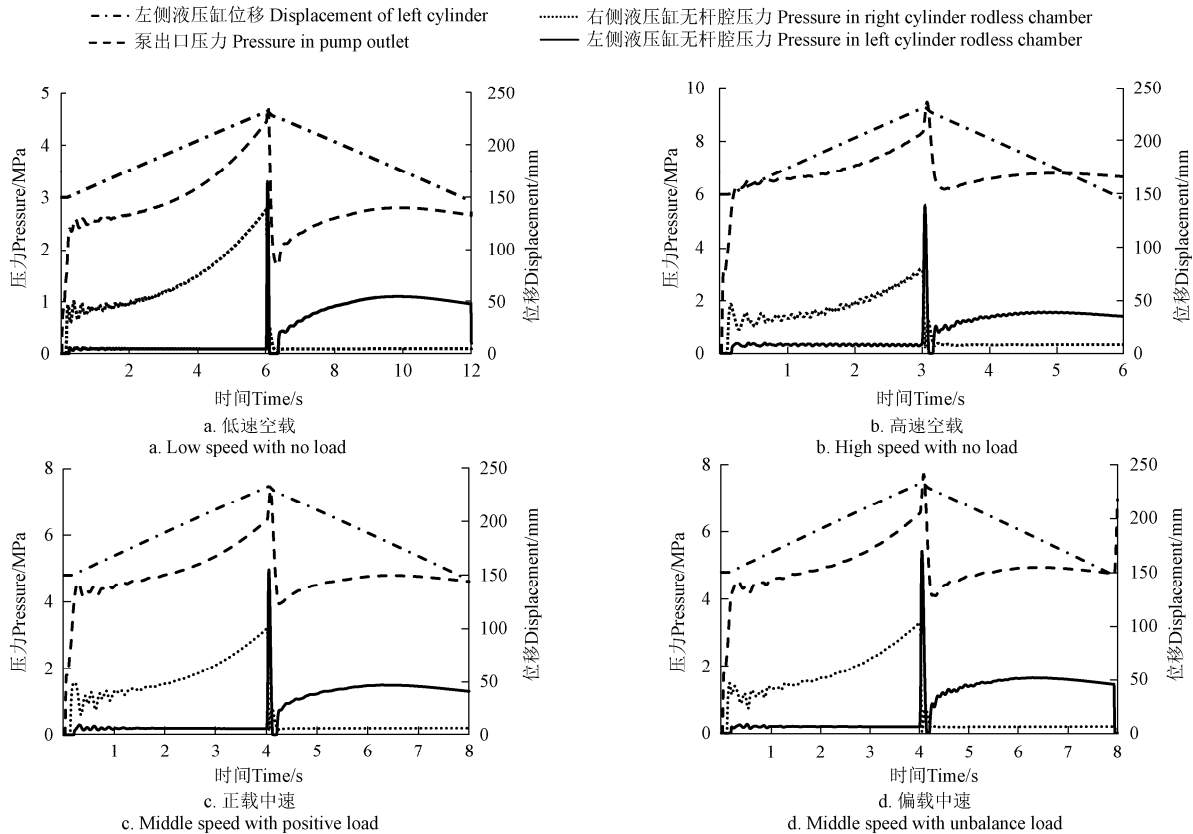
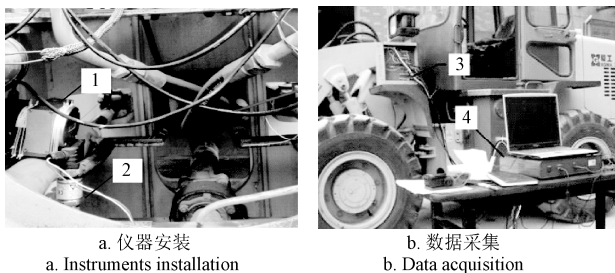


图6 负荷传感原理转向过程仿真结果

Fig.6 Simulation results of load sensing principle during steering

a. 仪器安装  
a. Instruments installationb. 数据采集  
b. Data acquisition

1. 位移传感器 2. 压力传感器 3. PCB 接线板 4. 数据采集分析仪  
1. Displacement transducer 2. Pressure transducer 3. Terminal block 4. Data acquisition analyzer

图7 装载机转向试验仪器

Fig.7 Instrument in steering test of wheel loader

保持与上述仿真研究中原地 4 种转向工况控制条件相同, 对装载机转向系统进行试验测试。如图 8 所示, 为负荷传感原理转向过程试验结果。由图 8a 与 8b 中曲线对比可知, 随着转向速度的提高, 系统各腔压力值大小及其波动幅值变大, 尤其是在转向初始阶段。当前车架达到机械限位时, 方向盘仍可转动, 转向器供给液压缸油液, 因此液压缸高压腔压力在很短时间达到溢流值, 产生很大的溢流损失, 在实际操作中应尽量避免方向盘打死及频繁高速转动方向盘。由图 8c 与 8d 中曲线对比可知, 负载质量越大, 各腔压力值波动越明显。

以低速空载工况为例, 对试验与仿真结果进行对比分析。转向初始阶段, 仿真结果中泵出口压力维持在 2.5 MPa 左右, 这与试验值基本相同, 且转向缸 2 腔压力

值也与试验结果基本相同。此外, 仿真结果中各压力的变化趋势与试验结果基本相似。二者差别较大的部分在于各腔压力值的波动情况。这是由于试验过程中, 操作者对方向盘输入的位移信号不连续, 常出现阶跃输入, 人为导致系统压力波动较大。而仿真研究中, 方向盘控制信号是连续的, 不存在阶跃输入, 压力波动相对较小。此外, 文中建立的仿真模型存在一定简化, 这使仿真结果与试验结果存在一定差别。另外, 二者差别较大的部分是泵出口溢流值的不同, 这是由于仿真研究中, 装载机刚到达极限位置, 液压系统油液方向产生变化, 大大减少了溢流时间。同样, 通过对图 6 中其余各工况下仿真结果与图 8 中试验结果逐一进行对比, 可看出各工况下仿真结果中各腔压力值大小及变化趋势与试验结果基本相似。因此, 可验证所建立的负荷传感转向系统联合仿真模型具有较高的仿真能力且仿真结果具有高的可信度。

## 5 电液流量匹配转向系统联合仿真

基于上述对负荷传感系统仿真模型的准确性验证, 可将电液流量匹配系统对原模型中液压模型部分进行置换, 从而对该系统中泵的能量消耗及系统各腔压力变化情况进行研究。图 9 所示为伺服电机控制系统的仿真模型。正弦曲线的斜率在初始阶段由 0 变为最大值, 之后逐渐减小, 这一特征符合转向初始阶段方向盘转动速率有阶跃变化, 之后逐渐降低的特征。因此用正弦信号近似地模拟转向动作信号, 且可改变正弦信号的周期从而改变方向盘转速大小, 角位移控制信号模块见图 9。



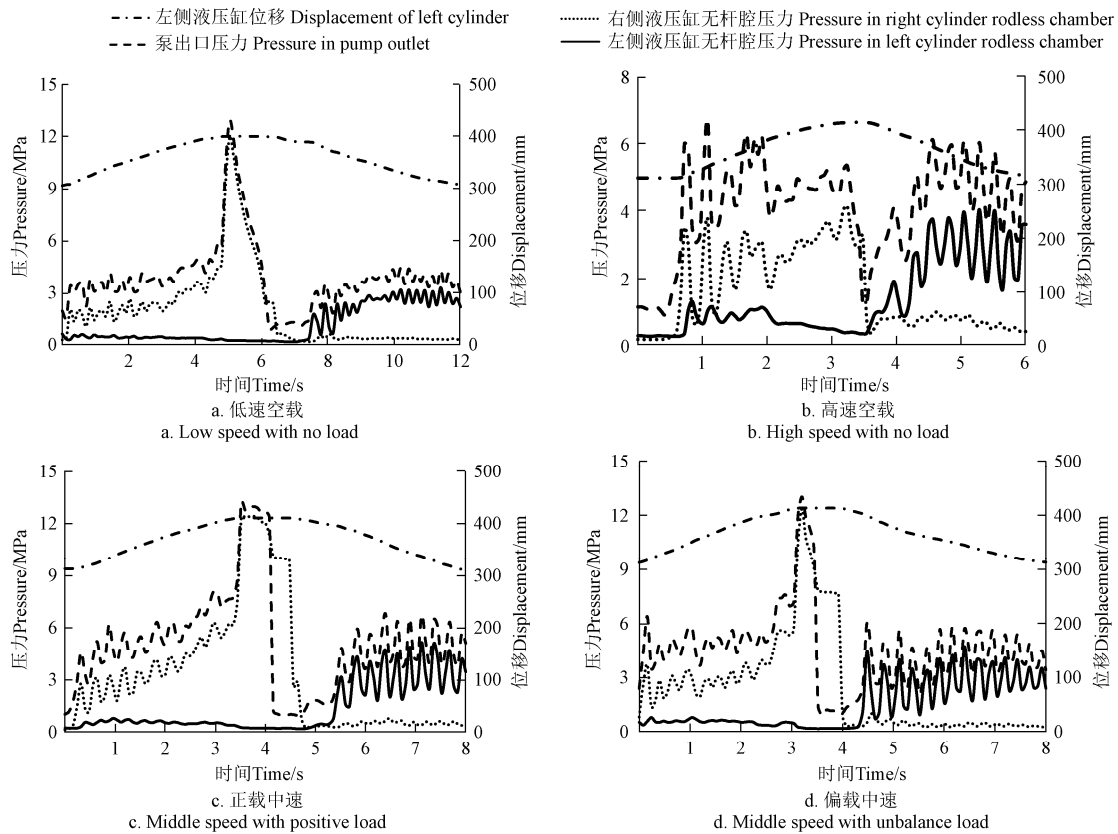


图 8 负荷传感原理转向过程试验结果

Fig.8 Test results of load sensing principle during steering

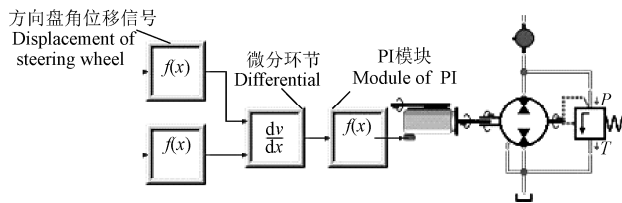


图 9 伺服电机控制系统

Fig.9 Control system of servo motor

图 10 所示为采用电液流量匹配原理的转向过程仿真结果。由图 10 中曲线可知，转向初始阶段，泵出口及右侧转向液压缸无杆腔压力出现较大冲击，这是由电机转速突然达到最大值而导致的。另外，通过与试验数据对比，该系统在转向过程中各腔压力波动范围降低，这是由于蓄能器的稳压作用。由于蓄能器在转向过程中对泵的吸油口提供一定压力，最终使泵的输出能耗有所下降。电机转速在转向过程中逐渐降低，最终为 0，泵出口压力值逐渐降低。由图 10a、10b 中曲线可知，高速转动方向盘时，系统中各腔压力大于低速转动，由于蓄能器稳压作用，其压力波动范围没有明显区别。由图 10c 与 10d 中曲线可知，偏载工况系统负载分布不均，泵出口压力值略大于正载工况，2 种工况下压力波动范围没有明显区别。

## 6 能耗对比分析

通过对负荷传感系统及电液流量匹配系统在各转向工况下泵所消耗能量进行计算，可明确本文提出的转向原理的节能情况。如图 11 所示为伺服电机在各工况下输出功率曲线图，由图中曲线可知，电机在阶跃信号激励下，功率波动较大，因此需对其控制系统稳定性进行改善。此外，若采用电压为 48 V、容量为 12 Ah 的电瓶作为转向动力源，装载机工作 60 min，取转向时间为 20 min，转向过程中电机功率取平均值 4 kW，考虑放电系数及逆变效率，经计算，约需要提供上述电瓶 4 块。另外，泵在转向过程中所消耗总能量可通过软件 Simulation X 中的积分模块对泵出口输出功率进行积分计算获得。如表 1 所示，为各工况下泵出口能量消耗。

经计算，低速空载原地转向工况，电液流量匹配系统相对负荷传感系统，泵消耗能量降低 36%，高速空载为 37%，中速正载为 39%，中速偏载为 28%。电液流量系统平均降低了转向过程中泵输出能耗约 30%，这主要是因为该系统不仅避免了原系统存在的高压溢流情况，而且使泵输出流量与负载相匹配，减少了中位卸荷损失。此外，系统中蓄能器对泵的吸油口提供一定压力，也使其能耗有所降低。

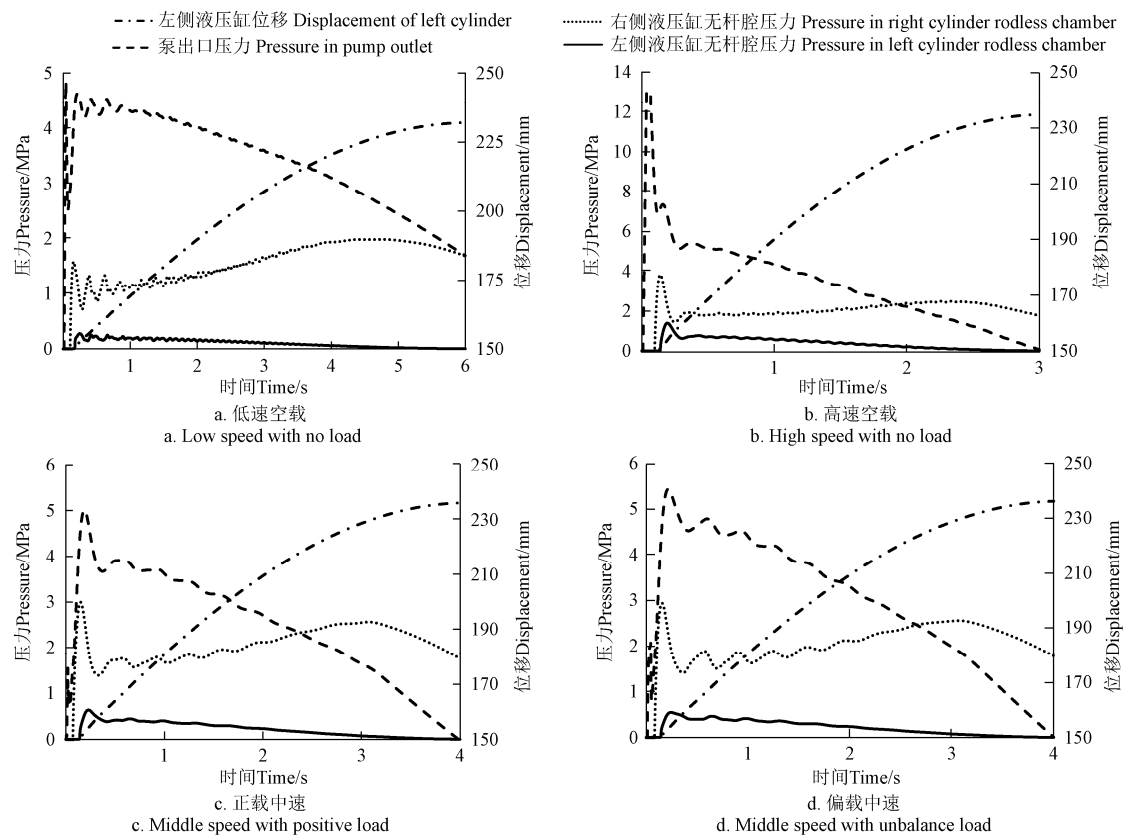


图 10 电液流量匹配原理转向过程仿真结果

Fig.10 Simulation results of electric-hydraulic flow matching principle during steering

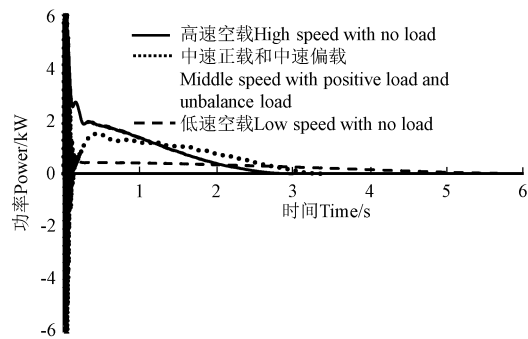


图 11 伺服电机输出功率

Fig.11 Output power of servo motor

表 1 泵出口能量消耗

Table 1 Energy consumption in pump outlet

工况 Working conditions	负荷传感系统 Load sensing system	电液流量匹配系统 Electric-hydraulic flow matching system
低速空载 Low speed with no load	2 165	1 391
高速空载 High speed with no load	4 859	3 052
中速正载 Middle speed with positive load	3 545	2 153
中速偏载 Middle speed with unbalance load	3 610	2 579

7 结 论

本文通过联合仿真研究,对电液流量匹配转向系统中泵输出功率在各转向工况下进行计算。

仿真结果表明:空载低速原地转向工况,电液流量匹配转向系统相对负荷传感转向系统,泵消耗能量降低了 36%,空载高速原地工况为 37%,正载中速原地工况为 39%,偏载中速原地工况 28%。电液流量系统平均降低了转向过程中泵输出能耗约 30%,该系统避免了高压溢流损失与中位卸荷损失。

电液流量匹配转向系统使泵输出流量随转向液压缸需求进行调节,减少了系统中有关流量的损失,对载荷变化频繁且动作频繁的液压系统的设计具有借鉴意义。

[参 考 文 献]

[1] Daher N A, Ivantysynova M. Pump controlled steer-by-wire system[R]. SAE Technical Paper, 2013.

[2] Daher N A, Ivantysynova M. Energy analysis of an original steering technology that saves fuel and boosts efficiency [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 1059—1068.

[3] Daher N A, Ivantysynova M. New steering concept for wheel loaders[C]//Hubertus Murrenhoff 9th International Fluid Power Conference. Germany, Aachen: IFK, 2014: 112—117.

[4] 王同建, 陈晋市, 赵锋, 等. 全液压转向系统机液联合仿真及试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(3): 607—612.

Wang Tongjian, Chen Jinshi, Zhao Feng, et al. Mechanical-hydraulic co-simulation and experiment of full hydraulic steering systems[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(3): 607—612. (in Chinese with English abstract)

- [5] 王存堂, 魏红星, 朱宏, 等. 全液压转向器计算机测控系统设计与工程实践[J]. 液压与气动, 2013(6): 59—62.  
Wang Cuntang, Wei Hongxing, Zhu Hong, et al. Computer monitoring system design of full-hydraulic steering and engineering practice[J]. Chinese Hydraulic & Pneumatics, 2013(6): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王小明, 张海, 邓建明, 等. 全液压转向系统的动态特性仿真[J]. 机床与液压, 2012, 40(17): 123—126.  
Wang Xiaoming, Zhang Hai, Deng Jianming, et al. Dynamic characteristics of double buffering load sensor large-flow amplification hydraulic steering system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(17): 123—126. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王刚. 同轴流量放大全液压转向系统特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
Wang Gang. Characteristics Research on Full Hydraulic Steering System with Coaxial Amplification[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [8] 景军清, 徐新跃. 双泵合/分流负荷传感型全液压转向系统的应用[J]. 建筑机械, 2005(1): 91—92.  
Jing Junqing, Xu Xinyue. Application of hydraulic steering with double pump confluence/shunt load sensing[J]. Construction Machinery, 2005(1): 91—92. (in Chinese with English abstract)
- [9] 樊文建, 杨敬, 权龙. 铰接式装载机转向特性的分析与试验研究[J]. 液压与气动, 2014(9): 43—47.  
Fan Wenjian, Yang Jing, Quan Long. Analysis and experimental research on steering characteristics of articulated loader[J]. Chinese Hydraulic & Pneumatics, 2014(9): 43—47. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨忠炯, 何清华. 铰接车辆液压动力转向系统动态特性仿真[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(1): 80—85.  
Yang Zhongjiong, He Qinghua. Simulation of dynamic characteristics of hydraulic power system of articulated vehicles[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(1): 80—85. (in Chinese with English abstract)
- [11] 闫旭冬, 杨敬, 权龙. 装载机工作过程联合仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 102—109.  
Yan Xudong, Yang Jing, Quan Long. Co-simulation and experiment of wheel loader during operation process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 102—109. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邓斌, 王国志, 刘桓龙, 等. 装载机负荷传感转向液压系统[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(3): 47—49.  
Deng Bin, Wang Guozhi, Liu Henglong, et al. Steering hydraulic system of load sensing for loader[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(3): 47—49. (in Chinese with English abstract)
- [13] 蔡政军. 新型液压系统在装载机上的实施[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
Cai Zhengjun. New Hydraulic System Used in Wheel Loader[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [14] 邓斌, 刘桓龙, 于兰英, 等. 装载机变量液压节能技术[J]. 建筑机械, 2005(9): 80—82.  
Deng Bin, Liu Henglong, Yu Lanying, et al. Variable hydraulic energy-saving technology of loader[J]. Construction Machinery, 2005(9): 80—82. (in Chinese with English abstract)
- [15] 蒲显坤, 孔鹏. 新型直驱式液压转向系统的研究[J]. 机械, 2013, 40(10): 19—21.  
Pu Xiankun, Kong Peng. A new design of direct drive of hydraulic steering system[J]. Machinery, 2013, 40(10): 19—21. (in Chinese with English abstract)
- [16] 谭兆钧, 韩嘉骅, 姚进. 混合动力装载机变频泵控转向液压系统的鲁棒控制器设计[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(增刊 1): 177—182.  
Tan Zhaojun, Han Jiahua, Yaojin. Robust controller design for variable frequency pump-control steering hydraulic system of hybrid wheel loader[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2013, 45(Supp.1): 177—182. (in Chinese with English abstract)
- [17] 危银涛, 冯希金, 冯启章, 等. 轮胎动态模型研究的进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(4): 311—323.  
Wei Yintao, Feng Xijin, Feng Qizhang, et al. State of the art for tire dynamical model research[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5(4): 311—323. (in Chinese with English abstract)
- [18] 危银涛, 沈筱亮. 轮胎稳态运动学与六力预报 I: 理论与方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 65—74.  
Wei Yintao, Shen Xiaoliang. Theory and method of tire rolling kinematics and prediction of tire forces and moments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(15): 65—74. (in Chinese with English abstract)
- [19] 危银涛, 罗亦文, 缪一鸣, 等. 复杂轮胎钢帘线双尺度结构分析[J]. 中国机械工程, 2014(1): 123—129.  
Wei Yintao, Luo Yiwen, Miao Yiming, et al. Two scale structural analysis of complex steel cord analysis radial tires[J]. China Mechanical Engineering, 2014(1): 123—129. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郭孔辉, 金凌鸽, 卢荡. 统一轮胎模型在车辆动力学仿真中的应用[J]. 吉林大学学报工学版, 2009, 39(增刊 2): 241—245.  
Guo Konghui, Jin Lingge, Lu Dang. Application of unitire in vehicle dynamics simulation[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(Supp.2): 241—245. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郭孔辉, 袁忠城, 卢荡. UniTire 轮胎稳模型的联合工况预测能力研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(6): 555—568.  
Guo Konghui, Yuan Zhongcheng, Lu Dang. A study on the prediction capability of untire model for combined slips mode[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(6): 555—568. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张志文. 串联式重度混合动力装载机传动方案与控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
Zhang Zhiwen. Study on Transmission Scheme and Control Strategy of Series Heavy Hybrid Loader[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese with English abstract)

- [23] 徐礼超. 装载机转向缸外负载力变化特性的试验研究[J]. 矿山机械, 2013, 41(11): 36—39.  
Xu Lichao. Tset study on variation characteristics of external loading of steering cylinder in loader[J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(11): 36—39. (in Chinese with English abstract)
- [24] 徐礼超, 葛如海, 常绿. 典型工况下装载机液压系统载荷时间历程的制取方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 57—62.  
Xu Lichao, Ge Ruhai, Chang Lü. Acquisition method of load time course of loader hydraulic system under typical operating conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 57—62. (in Chinese with English abstract)
- [25] 徐礼超. 装载机转斗缸外负载力变化特性的测定[J]. 金属矿山, 2013(9): 135—137.  
Xu Lichao. Determination of the external load change characteristic of loader bucket cylinder[J]. Metal Mine, 2013(9): 135—137. (in Chinese with English abstract)

## Analysis on steering characteristics of wheel loader based on electric-hydraulic flow matching principle

Yan Xudong, Quan Long, Yang Jing

(Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** As one of the most commonly used construction project machines, wheel loader has the problems of high fuel consumption and serious emissions. On one hand, the hydraulic steering system which uses a fixed displacement pump, will produce large energy losses; on the other hand, the action of steering is frequent during working process. Therefore, reducing the energy consumption of steering system is becoming one of the key research directions. Currently, small wheel loader generally uses load sensing steering system. Although the pressure of the system can match the load, the flow of the fixed displacement pump is proportional to the engine speed and can't match the varied loads, which leads to energy losses. For this issue, a new steering control method of electro-hydraulic flow matching which adopts a servo motor to drive the fixed displacement pump independently is proposed. By this method, the ratio between cycle number of motor and angle of steering wheel changes to a certain value. The speed of motor will level off if there is no steering movement, so finally the system energy consumption can be reduced. Meanwhile, in case of motor fault, this system automatically switches into the primal system by adopting electromagnetic valve. In addition, an accumulator is also added to the new method to reduce the installation power of servo motor. The loader co-simulation model built by the software Simulation X is used to simulate and calculate the characteristics of the steering system under pivot steering condition. The models of steering gear and tire have been described specifically during the modeling. The relationship between flow area and relative angle of the steering gear's spool and sleeve is achieved by adopting the valve edge module in software Simulation X. Meanwhile, the testing system platform is built to test the accuracy of simulation model. Before the experiment, displacement transducers and pressure transducers are installed to avoid affecting the performance and structure of wheel loader. The accuracy of simulation model is verified by comparing the results of simulation and experiment. The difference between the 2 results is mainly due to the discontinuous input signal of steering wheel. In addition, the model established in this paper is simplified appropriately. At last, the simulation model is used in the electro-hydraulic flux matching steering system. By comparing the energy efficiency between load sensing system and electro-hydraulic flux matching system, the simulation results show that, the energy consumption under the no-load condition with low and high speed can be reduced by about 36% and 37% respectively when using this method. Moreover, the energy consumption under positive and unbalanced load with middle speed can be reduced by about 39% and 28% respectively. This is mainly due to that the electro-hydraulic flux matching steering system can avoid not only the overflow losses when high pressure appears, but also the median loss of unloading. Moreover, the accumulator can provide certain pressure to the suction port of pump during the steering process, which also can finally decrease the output energy of pump. The output power of servo motor and battery capacity are calculated in this paper finally. The electric-hydraulic flow matching method can adjust the flow of pump according to the need of steering hydraulic cylinders, and thus decrease the loss of oil flow. Therefore, this method can provide a reference to the design of other hydraulic systems in which the load frequently changes.

**Key words:** loaders; hydraulics; models; flow matching; electric-hydraulic steering; energy consumption