

拖拉机集成 PTO 的电液悬架系统研究

张士强¹ 窦海石²

(1 河北铠特农业机械有限公司 河北 邯郸 057750; 2 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100000)

摘要: 悬架和 PTO 系统是拖拉机的重要部件, 为提高拖拉机液压悬架系统的智能化和精确控制水平, 本文在对拖拉机传统液压悬架与电控液压悬架进行对比分析的基础上, 建立基于 AMESim 软件集成电液悬架系统仿真模型, 仿真研究了不同工况的系统特性, 提出一种阀泵协同电液系统效率最优控制方法。研究结果表明集成 PTO 的电液液压悬架系统具有更高的智能化程度、工作效率和精度, 研究为系统开发提供了方案。

关键词: 拖拉机; 电液悬架; 仿真分析; 阀泵协同控制

1 液压悬架系统简介

液压悬架系统是实现拖拉机机具作业的重要装置, 它用于连接和操作农业机具, 以液压为动力, 实现机具的升降调节耕作深度。拖拉机液压悬架系统主要由液压系统和连杆组成。根据油泵、分配器和油缸等液压元件在拖拉机底盘上的相对位置, 可将液压悬架系统可分为三种类型。

1.1 分置式液压悬架系统

分布式液压悬架中液压元件受空间约束较小, 元件之间分布较为分散, 它们之间通过油管相互连接。这种类型的优点是布局不受空间限制, 液压元件接口具有互换性, 便于产业化生产。因各部件单独安装, 连接管道较多, 增加了液压油泄漏的概率。此外该构型需要在机具上安装限深轮, 通过安装不同直径的限深轮和调节机构改变限深轮的离地间隙, 这种耕作深度调整法又称高度调整法。

1.2 整体式液压悬架系统

整体式液压悬架是由油泵、油缸、分配器(液压阀)等元件组合成的液压系统, 各元件集中分布, 被称为提升器。这种构型使用的液压油来自变速器内的齿轮油。该构型结构紧凑, 运行可靠。但由于液压元件结构复杂、互换性差, 产业化推广较为困难。

1.3 半分置式液压悬架系统

半分置式液压系统中液压油泵单独安装, 提升器主要由油缸和分配器构成。油泵由齿轮箱或动力输出轴驱动。该构型兼有分置式和整体式的优点, 在中、小功率拖拉机上有着较为广泛的推广。

传统液压系统主要由动力部分的液压油泵, 控制部分的分配器和工作部分的油缸组成。分配器(液压阀)

主要用于控制系统中液压油的方向和大小。通过液压阀的阀芯控制液压系统实现机具提升、下降、中立和浮动的功能。

(1) 提升: 当液压阀与液压缸的无杆腔联通时, 液压油泵通过滤清器吸入油液, 并通过液压阀将高压油输送至无杆腔缸。在高压油的作用下, 推动活塞末端连接提升的机具。

(2) 下降: 当液压阀与回油管路接通时, 油缸中的高压油通过液压阀的回油孔排出, 机具在重力作用下使活塞移动机具下降。

(3) 中立: 当农具升降到预定位置时, 在液压阀的作用下, 油缸将不再继续供油, 液压油泵输出的油不再供给液压缸。在中位机能作用下油缸中的油不会进出, 其液压力与农具的重量相平衡, 农具与拖拉机形成刚性连接。

(4) 浮动: 浮动位置多用于分置式液压系统, 液压阀联通油缸的有杆腔和无杆腔时, 农具处于浮动状态。耕作深度通过调整机具深度的限制轮来调节。

传统的液压悬架系统耕深调节的方法主要有列三种: ①通过限深轮半径的高度调节法; ②调整机具相对于拖拉机位置的位置调节法; ③调节机具深浅使牵引阻力不变的力调节法。

2 相关研究介绍

传统的液压悬架主要通过机械方式控制主控阀阀芯的位置进而调节液压系统的输出。拖拉机在作业时受外部冲击载荷和内部发动机转矩波动影响, 使主阀阀芯单变量调整作业机具姿态的方式难以适应高作业精度的要求。电子液压悬架采用电子控制单元并将多变量联合控制策略写入控制算法中, 应用到拖拉机液压

悬架系统上，阀、泵和液压缸的准确控制将提高拖拉机的自动化水平和精准耕作。与机械控主阀阀芯的液压悬架系统相比，电液悬架系统的主要区别在于闭环式电子控制单元的应用，用电液比例换向阀（或组合阀）代替液压分配器，通过传感器采集拖拉机上的实时状态信息。

3 电控液压悬架系统建模

电控液压悬架工作原理：通过角度传感器、拉力传感器和转速传感器的信号采集，电子控制器经过AD转换、PWM频率量采集计算得到机具的耕作深度、拖拉机牵引阻力和当前的滑转状态；农田作业时根据驾驶员的意图通过电子控制器发送耕作深度、机具下降速度、机具作业姿态等指令，电子控制单元根据传感器采集到的值，经控制算法处理后转化为比例阀或开关阀的电流大小，再通过CAN总线将阀口的开启方向和开启百分比发送至电液比例阀控制器ECU，液压系统将压力能转化为势能和动能，驱动三点悬架机构，使机具达到理想的作业姿态。

借助AMESim软件搭建如图1所示的液压系统原理图，主缸用于机具的提升，副缸用于其他动力元件的输出。为实现提升、停止、浮动和下降的作业需求，三位四通阀和两位二通阀串联在有杆腔回路上，在浮动阶段，两位二通阀将主缸的有杆腔和无杆腔联通，在机具重力作用下无杆腔压力继续上升。机具下降阶段，压力油回到油箱，主油路卸荷。

4 电控液压悬架系统耕深调节方法研究

耕作深度的一致性和拖拉机负载的多维振动参数的幅值是评价电液悬架可靠性的重要指标。但拖拉机工作环境受内部发动机转矩波动，外部受地形、作业环境和土壤参数的影响。拖拉机悬架系统受耕深阻力、滑转率等控制参数影响是一个非线性变参数的惯性系统。目前成熟的拖拉机电液悬架系统控制方法主要有：位置控制、力控制、力位综合控制和滑移率控制。通过AMESim软件仿真耕深调整阶段主缸无杆腔压力，各阶段的主缸压力如图2所示。

旋耕作业模式下PTO输出轴所需要的动力经验公式求得，所需功率表示为：

$$P_x = 0.1(K_g K_1 K_2 K_3 K_4) h v B$$

式中， h 和 B 为旋耕深度和幅宽， v 为拖拉机行驶速度， K_g 为旋耕阻力系数， K_1-K_4 为土壤参数修正系数。

本文研究的耕作深度调整方案采用由滑移率调整和其他调整方法（位置调节、力调节和力位综合调节）组成的开关切换方法。在位置调整过程中，悬架的相对高度或犁耕深度的实际值由安装转动副上角度传感器转换计算得到。控制系统将人为设定的耕深指令值和传感器采样得到的实际值做闭环处理，控制逻辑和算法中给定开关阀或比例方向阀开启的方向和大小，经闭环控制使两者之间的误差趋于零。力调整控制的对

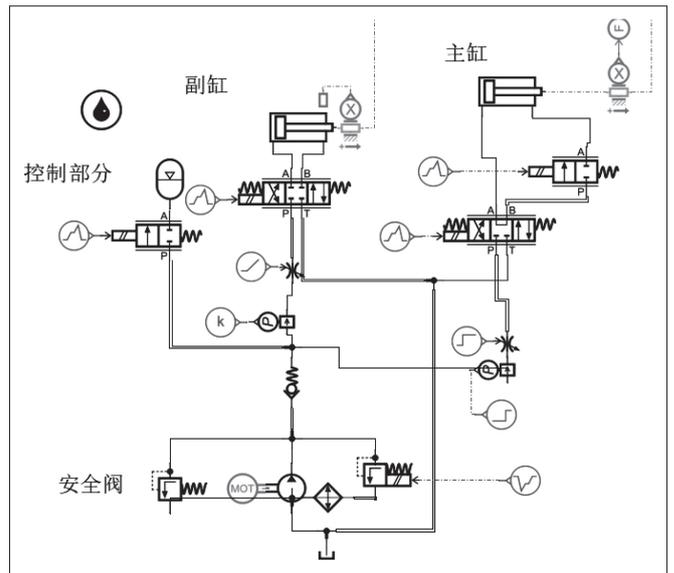


图1 液压系统原理图

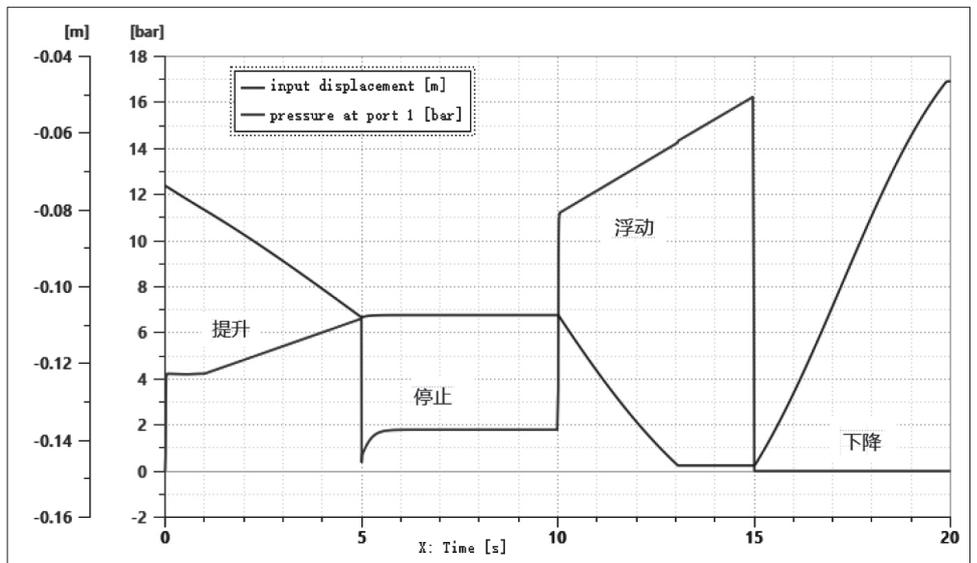


图2 各阶段主缸压力

象是拖拉机的牵引阻力，拖拉机作业时的阻力由安装在拉杆上的拉力传感器测得，悬架系统根据土壤参数不同时的阻力，动态调整农具耕作深度，使拖拉机作业时的牵引阻力接近一稳定值 [3]。

力位综合调整是位置调整和力调整相结合的调整方法，力位综合使耕作深度稳定在一定范围内。同时，考虑了拖拉机负载的波动，结合了位置调整和阻力调整各自的优势。在耕作土壤成分差异较大和地形不平坦的情况下，可以获得良好的耕作质量和更好的发动机负载稳定性。

5 阀泵控制策略

阀泵协同控制是利用变量泵根据拖拉机作业时负载的大小不同，输出排量可变的液压油，负载变大时变量泵输出排量增加，负载减小时变量泵输出排量减小。相比于定量泵的电液控制方法，阀泵协同具有能耗低，位置控制精确，减小油压波动等优点。本文提出根据设定犁耕深度和角度传感器反馈的实际犁耕深度和主缸无杆腔油压波动为信号输入的模糊 PID 排量控制策略。模糊规则的制定中，当设定耕深和角度传感器反馈值相差较大时，模糊规则参数整定中比例项增大，当无杆腔油压波动较大时，参数整定的微分项增大，参数整定的积分项根据机具的位置精度进行调节。阀泵协同控制策略流程图如图 3 所示。

6 结语

本文分析了电液悬架提升、下降、浮动和中位的工作原理，利用电液控制液压悬架系统，能够在复杂的作业环境中完成力调节、位调节和力位综合调节，进而在动态工况下控制耕深调节。借助 AMESim 软件搭建电液悬架系统模型。对电液悬架耕深调节系统进行仿真，并提出耕深调节时阀泵协同的控制策略，其意义主要在于促进拖拉机机具的控制精度，降低电液悬架的能耗和油压波动，提高拖拉机悬架系统的自动化水平，使拖拉机的作业质量得以提高。

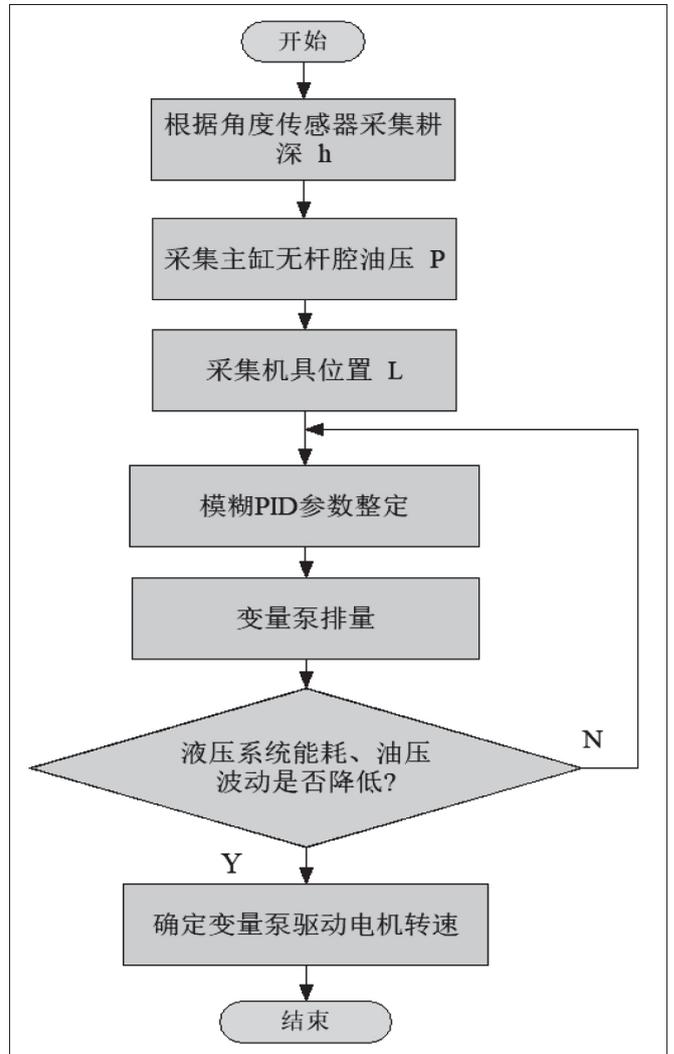


图 3 阀泵协同控制流程图

参考文献：

[1] 范永奎, 翟志强, 朱忠祥, 等. 丘陵山地拖拉机电液悬架仿形控制系统研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 517-524.

[2] 刘长卿, 华博, 杜岳峰, 等. 拖拉机电液悬架系统动压反馈校正方法研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 535-541.

[3] 栾圣罡. 拖拉机液压提升器提升能力检测试验台的设计研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2002.