DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.02.002

谷物联合收获机底盘自动升降液压系统设计与试验

雷小龙[1], 陈宇[1], 李举[1], 阳科[1], 刘成[2], 余向阳[2]

(1. 四川农业大学机电学院,四川雅安,625014; 2. 四川菁农汇智科技有限公司,四川成都,610041)

摘要:针对小型谷物联合收获机在丘陵区作业倾斜角度大、通过性差等问题,开展谷物联合收获机底盘自动升降液压系统设计与试验。本研究设计了底盘自动升降液压系统总体结构,对内置位移传感器液压缸、比例换向阀等关键部件进行设计和选型,提出了基于横向倾斜角度伸缩液压缸进行调平和升降的方法,采用自动调平控制和手动调平两种调平模式对底盘进行调平。应用AMEsim开展液压系统的仿真分析,发现换向时液压缸压力与流量稳定,位移速度平稳。设计了以PLC控制器和PID控制方法为核心的调平控制策略,通过调节液压缸长度实现对底盘的姿态调节,并开展静态调平试验。结果表明:比例换向阀开度范围为20%~45%时,能有效控制液压缸伸缩速度;调节时间随倾斜角度增加而增加,在倾斜角度7.7°范围内的总体调节误差低于0.5°,可满足谷物联合收获机对底盘横向调平的需求。该研究提出了依据横向偏角实现调平的液压系统和控制方法,为小型谷物联合收获机底盘调平液压系统设计提供参考。

关键词:谷物联合收获机;底盘调平;液压系统;电液控制;比例换向阀

中图分类号:S225.3 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-7217(2024)02-0009-10

雷小龙, 陈宇, 李举, 阳科, 刘成, 余向阳. 谷物联合收获机底盘自动升降液压系统设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(2): 9-18

LEI Xiaolong, CHEN Yu, LI Ju, YANG Ke, LIU Cheng, YU Xiangyang. Design and experiment of chassis automatic lifting hydraulic system for harvester [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 9-18

0 引言

水稻是南方丘陵区重要的粮食作物,履带式谷物联合收获机在丘陵区广泛应用,促进了水稻机收率的提高[1]。由于丘陵区存在田块坡度较大、田间泥脚深等特点[2],对谷物联合收获机的通过性能提出了更高的要求。在坡道上行驶时,车体重心高可能导致收获机发生倾斜甚至侧翻;在深泥脚水田作业时,底盘离地高度不足会导致机械沉陷,通过性变差[3]。因此,研发具有升降功能的谷物收获机底盘是提高丘陵区收获机通过性及适应性的重要途径。

液压系统是底盘升降装置的关键部分,广泛应用于收获机的调平,如美国约翰迪尔、凯斯等公司研发的联合收获机调平系统,采用油路通断方式控制液压缸伸缩实现割台与地表平行[4-5];洋马YH1180和久保田EX-M等联合收获机根据倾斜角度应用液压缸伸缩实现机身调平[6-7]。国内调平系统以丘陵山地拖拉机和果园机械调平系统较多,提出了模糊PID[8-12]、双通道式PID[13]、增量式PID[14]等控制策略控制电磁阀,进而调节液压缸伸缩实现调平功能;针对履带式联合收获机,提出了依据底盘倾角调节液压缸伸缩长度[1, 15-16]等方法实现底盘全向调平等功能,提高了对地形的适应性。本文针对小型谷物联合收获机底盘横向调平的要求,设计一种电液控制系统,并开展仿真试验与试验验证。

1 谷物联合收获机底盘自动升降液压系统结构与工作原理

1.1 自动升降系统的结构与工作原理

谷物联合收获机底盘升降系统主要由液压缸、摇臂、转臂、连杆和中间梁等组成,如图1所示。该系统的工作原理基于两个相互关联的平行四边形机构,第一个平行四边形机构由前转臂、后转臂、中间梁以及机架组成,而第二个平行四边形机构由前摇臂、后摇臂、连杆和中间梁组成,液压缸与前摇臂和车架铰接。在运动过程中以前铰支座为旋转中心,液压缸伸长驱动前摇臂带动前转臂顺时针转动;通过平行四边形机构,将力传递到连杆、后摇臂和后转臂,使其以后铰支座为

收稿日期:2024-01-29 修回日期:2024-03-15

基金项目:四川省重点研发计划项目(2022YFG0077)

第一作者:雷小龙,男,1989年生,四川营山人,博士,副教授;研究方向为油稻机械化生产技术与装备。E-mail: leixl1989@163.com

旋转中心的顺时针转动。底盘离地距离由H_1升高至H_2,由于左右两侧离地距离不同,在地表不平的工况下可调平底盘或者底盘同步升降。其中,液压杆伸缩量决定了底盘倾斜度(α)和底盘升降高度($\triangle H$)(图2),液压杆会受到车架及收获机其余部分自重力的影响导致液压杆回缩。

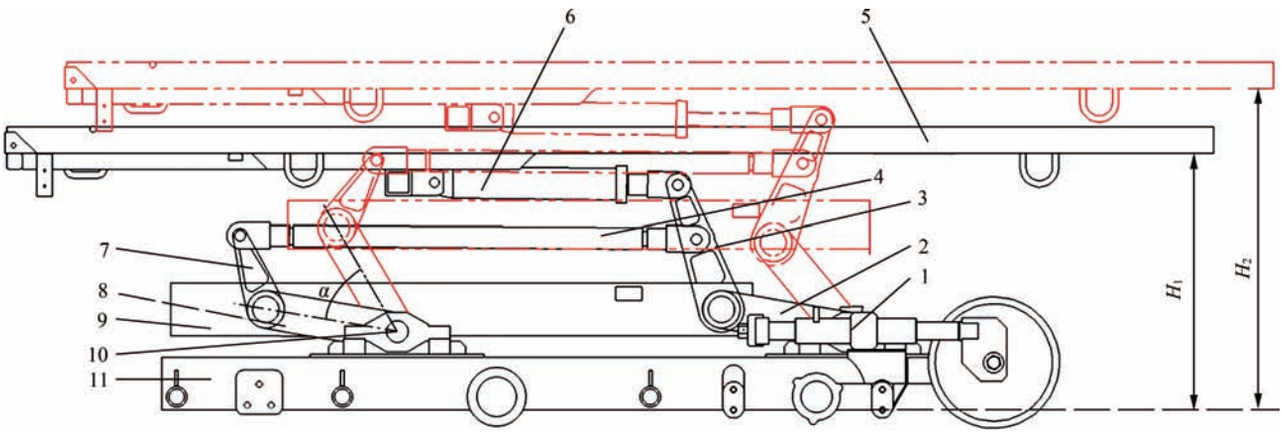


图1 底盘升降机构示意图

Figure 1 Schematic diagram of chassis lifting mechanism

1. 后铰支座 2. 前转臂 3. 前摇臂 4. 连杆 5. 车架 6. 液压缸 7. 后摇臂 8. 后转臂 9. 中间梁 10. 前铰支座 11. 机架

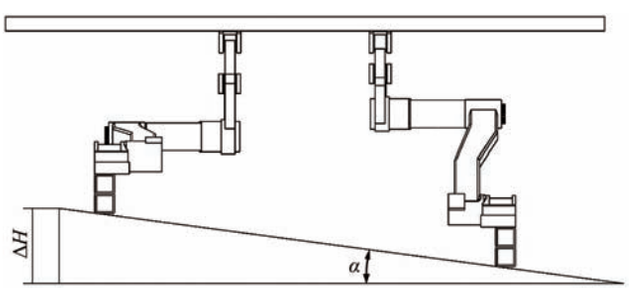


图2 底盘提升原理图

Figure 2 Principle diagram of chassis lifting

1.2 液压系统的结构与工作原理

底盘自动升降液压系统原理如图3所示,主要包括带位移传感器的液压缸、比例换向阀、平衡阀、液压锁、过滤器、测压模块、水平传感器和控制系统等。

该系统的工作时,首先水平传感器感知底盘倾斜状态,控制器决策后应用电磁阀导通控制液压缸伸出或收缩,带动底盘提升机构升降。

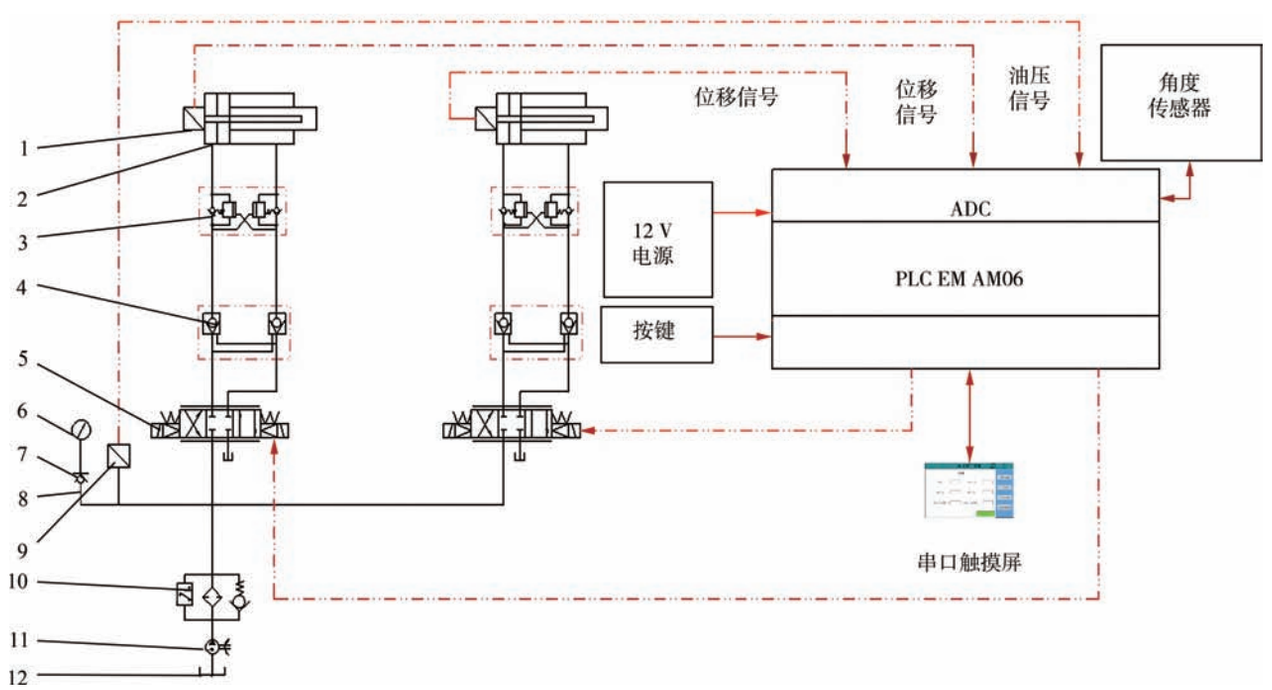


图3 液压系统原理图

Figure 3 Schematic diagram of hydraulic system

1. 液压缸 2. 磁致位移传感器 3. 双向平衡阀 4. 液压锁 5. 比例换向阀 6. 压力表 7. 测压软管 8. 测压接头 9. 压力传感器 10. 高压过滤器 11. 液压泵 12. 油箱

同时，比例流量阀打开，以确保液压缸的流量被控制在适宜范围内，并控制液压缸的伸缩速率，进而控制调平系统的响应速度与精度。

电磁换向阀为三位四通比例换向阀，滑阀中位机能为O型结构。通过设置溢流阀与比例换向阀同步通电断电，防止启动时压力过大导致液压杆动作不稳定，并保留适量预压力使液压缸快速移动，加快油缸响应速度，提高控制精度。由于收获机机身自重持续作用于液压缸上，换向阀从中位机能切换至左右位瞬间可能导致液压杆受力不均，采用平衡阀来调节压力差，以适应负载变化，实现对液压杆的压力补偿。内置于液压缸的位移传感器将实时监测液压杆的位置变化，并将其转换为电信号反馈给控制系统，以便实现闭环控制。

2　自动升降液压系统设计与分析

2.1　液压系统流量分析

考虑到系统升降速度与精度，要求液压缸伸出速度需达到2 400 mm/min。根据流量计算公式

$$Q_s=\frac{\pi v D^2}{4\times 10^6} \tag{1}$$

式中：Q_s——液压缸所需流量，L/min；

D——液压缸直径，mm；

v——液压杆移动速度，mm/min。

则单个液压缸流量Q_s约为7.5 L/min，共有2个液压缸，总流量Q_T为15 L/min，泵输出流量需达到15 L/min才能使液压调平系统正常工作。齿轮泵流量输出脉冲波动较大，为保证液压缸输入流量达到15 L/min，泵输出流量取整为28 L/min，液压系统压力取16 MPa。由于比例换向阀对于液压系统过滤性能要求高，在进油口设置过滤器，加大其过滤精度。

2.2　关键液压元件的设计与选型

2.2.1　液压缸的选型

液压缸是底盘升降液压系统的核心受力件，当液压缸推力F_1、拉力F_2和油压P已知时，液压缸直径

$$D=\sqrt{\frac{4F_1}{\pi P\eta_{cm}}} \tag{2}$$

式中：P——供油压力，MPa；

F_1——液压缸推力，N；

η_{cm}——液压缸的机械效率，取0.95。

当流量Q与速度v_1已知时，活塞杆直径

$$d=\sqrt{\frac{4}{\pi}\times\frac{Q}{v_1}} \tag{3}$$

式中：d——活塞杆直径，m；

Q——液压缸体积供油量，m^3/s；

v_1——活塞杆伸出速度，m/s。

根据国家标准GB/T 2348－2018规定，液压缸直径D取值为63 mm。由于内置传感器需求，活塞杆直径必须大于传感器最大直径且满足强度需求。已知传感器最大直径为14 mm，液压杆主要承受拉压载荷，将其简化为拉压杆进行力学强度校核，已知许用应力和载荷分别为20 MPa和27 440 N，则活塞杆直径d应大于44.078 mm，圆整取活塞杆直径为45 mm。

2.2.2　比例换向阀的设计

比例换向阀在液压系统中起流量调节作用，通过输入模拟量至比例阀，控制比例阀的阀芯开度，其关键结构参数为压差ΔP。极限工作压力P_{max}应大于液压系统压力，取25 MPa，当比例换向阀压差为系统压力的1/3时，比例换向阀的效率最高，压差ΔP取5.4 MPa。

$$Q_{max}\geqslant Q_n=\frac{Q_l}{\sqrt{\dfrac{\Delta P}{\Delta P_n}}} \tag{4}$$

式中：Q_{max}——最大流量，L/min；

Q_n——额定流量，L/min；

Q_l——负载流量，L/min；

ΔP——压差，MPa；

ΔP_n——额定压差，MPa。

取额定压差ΔP_n为7 MPa，根据式(4)得到最大流量Q_{max}应大于17.3 L/min。根据流量与通径关系，比例换向阀的通径为6 mm，额定压差(P-T)在7 MPa条件下，最大流量为55 L/min；中位机能为O型，极限工作压力为30 MPa，4～20 mA模拟量输入。输入4～12 mA时左位工作，12 mA时中位工作，12～20 mA时右位工作。

2.3　自动升降液压控制系统的设计

2.3.1　电液控制系统设计

自动升降电液控制系统包括位移传感器、角度传感器、油压传感器、控制器、显示器和操作手柄，控制器为西门子S7－200Smart ST20，电液控制系统元件的型号与参数见表1。位移传感器为磁致位移传感器，用于采集液压缸的位移，并将液压缸的位移转化为电压信号传入控制器。底盘倾角信号使用北微传感BWK218角度传感器，测量结果通过数模转换模块EM AM06传给控制器。显示器用于显示和调节系统参数，实现人机交互功能；调节按钮包括手动模式、自动模式、复位、急停等。控制系统工作时，传感器将检测的角度等物理量转换为模拟量，通过数据采集通道转换为数字量输入到PLC中，PLC执行调平程序计算得出比例阀开度，将比例阀开度通过数模转换模块转换为4～20 mA的模拟量输入至比例换向阀，控制比例阀

开度,从而控制液压缸伸缩速度;同步输出溢流阀控制信号至溢流阀,保持系统压力恒定在设定值。

表1 电液控制系统元件的主要型号和参数

Table 1 Main types and parameters of the components in the electro-hydraulic control system

名称	型号	参数
控制器	西门子 S7-200Smart ST20	标准型CPU模块,晶体管输出,供电 24 V DC
比例换向阀	4WRE6E16-10B/6AG24NZ4M	E型机能,供电 24 VDC,输入信号:±10 V
电磁换向阀	4WE6E50B/AG24N	E型机能,通径 6 mm,供电 24 VDC,线圈功率 30 W
液压缸	SNY-X-63-45-S	缸径 63 mm,杆径 45 mm,行程 S=200 mm,额定压力 16 MPa
磁致位移传感器	SNEJ-M0200-LQS1-DHT05-A01XN	检测距离 200 mm,供电 24 VDC,输出信号 4~20 mA
液压锁	Z2S6-1-30B	通径 6 mm,安装形式:叠加式
平衡阀	JPH-L08	最大流量 40 L/min,公称压力 16 MPa
角度传感器	BWK218	工作电流 20~60 mA,精度 0.2°,分辨率 0.02°
高压过滤器	ZU-H100*10DFP	流量 100 L/min,过滤精度 10 μm
油压压力传感器	SUP-300	40 MPa,4~20 mA
压力表	YN-100-Ⅳ-40MPa	最高压力 40 MPa

2.3.2 软件设计

底盘升降系统控制程序分为自动调平与手动调平两种模式,手动调平模式中,通过按钮手动控制液压缸的伸缩,可以调节液压缸的位移、比例换向阀开度和倾角等参数,实现底盘姿态调节。自动调节控制程序流程图如图4所示。

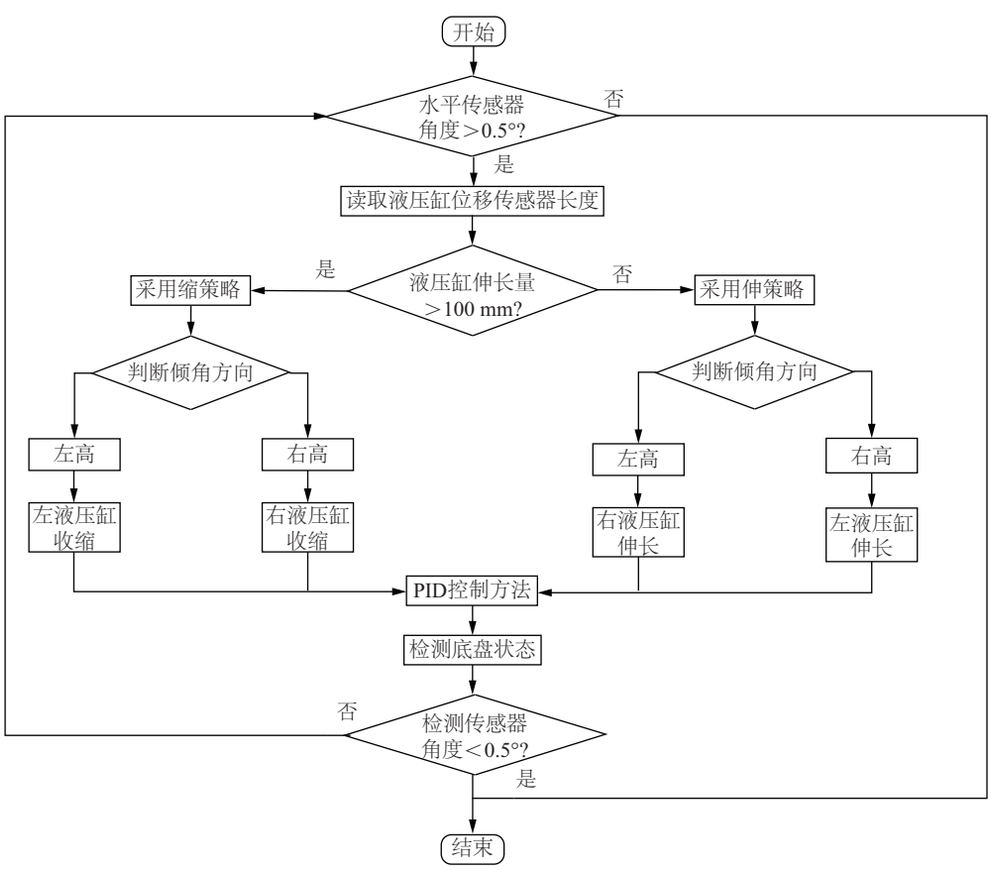


图4 自动调平流程图

Figure 4 Process diagram of automatic leveling

自动调平模式运行时,根据系统调平精度要求,设置调平阈值角度为0.5°;PLC控制器读取倾角值,当倾斜角度大于0.5°时,读取液压缸可伸缩余量,判断本次调平液压缸采用伸策略或是缩策略;根据底

盘姿态，应用 PID 控制方法调节液压缸长度，比例换向阀通电，底盘可执行左升、左降、右升、右降，底盘倾角发生变化，第一次调平结束，再次检测底盘姿态是否处于水平状态，循环至底盘姿态调整为水平状态。

液压调平系统人机交互界面如图 5 所示。

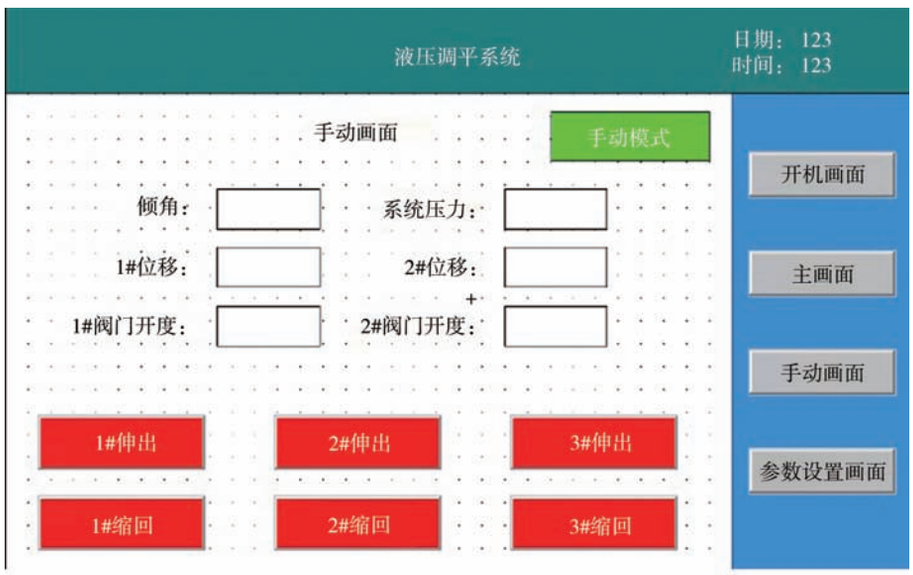


图 5　液压调平系统人机交互界面

Figure 5　Human-machine interface of hydraulic leveling system

3　底盘自动升降液压系统模型构建与仿真分析

3.1　AMEsim 模型构建

为检测液压系统的性能及其元件的合理性，开展液压系统仿真。

AMEsim 是多学科领域的复杂系统建模与仿真平台，应用 AMEsim 软件构建底盘自动调平液压系统模型，如图 6 所示。

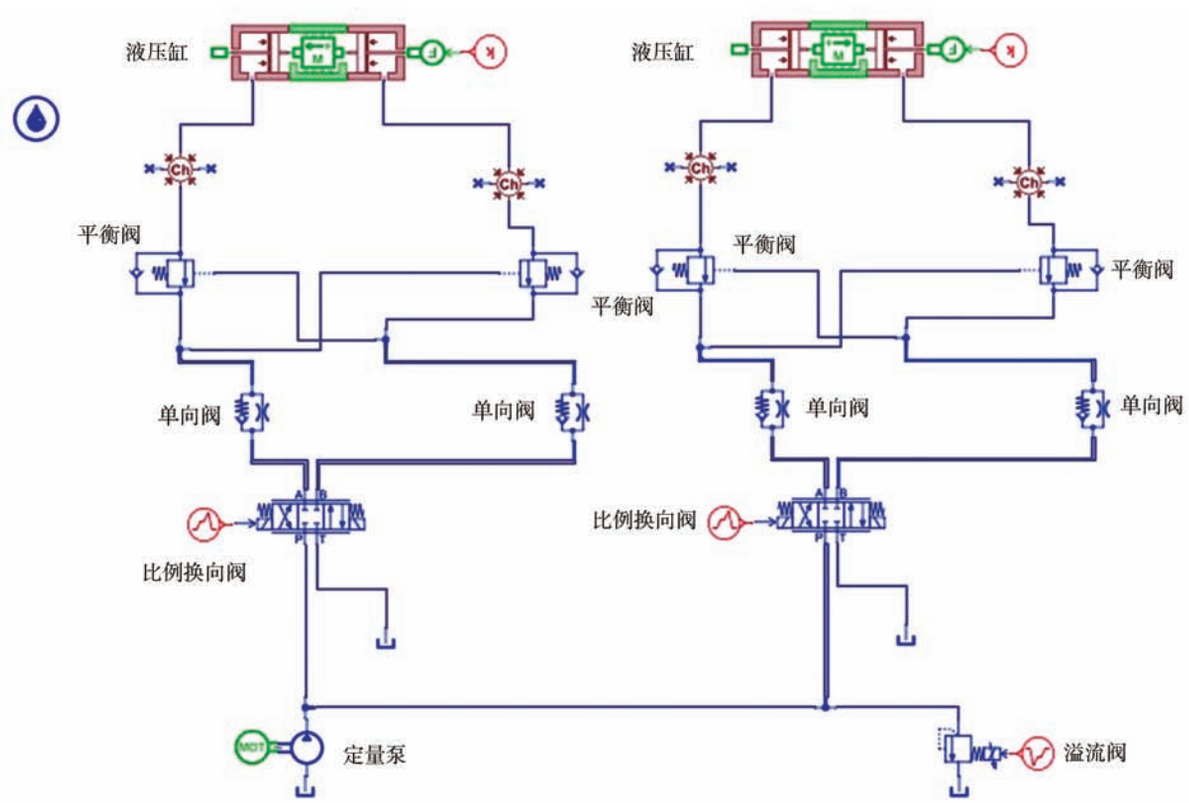


图 6　底盘自动升降系统模型图

Figure 6　Model diagram of chassis automatic lifting system

该模型主要包括液压缸、平衡阀、单向阀、比例换向阀、溢流阀和定量泵。通过平衡阀抵抗机身自重减少液压缸伸出与回缩时的速度差与压力差,保证液压系统工作时的平衡性。

仿真模型的参数如表2所示。

表2 仿真模型的主要参数

Table 2 Main parameters of the simulation model

名称	数值
外加载荷/N	27 440
质量块重量/kg	20
活塞直径/mm	63
活塞杆直径/mm	45
溢流阀溢流压力/MPa	16
平衡阀设置压力/MPa	12
定量泵转数/(r·min^{-1})	2 800
定量泵排量/(mL·r^{-1})	10

3.2 仿真结果分析

3.2.1 液压缸进口流压特性分析

根据理论分析,收缩时液压缸同时受到液压油的推力和机身自重的影响,此时为液压系统最不稳定的状态。设定液压缸处于收缩工作行程,收缩时液压缸进口流压特性曲线图如图7所示。

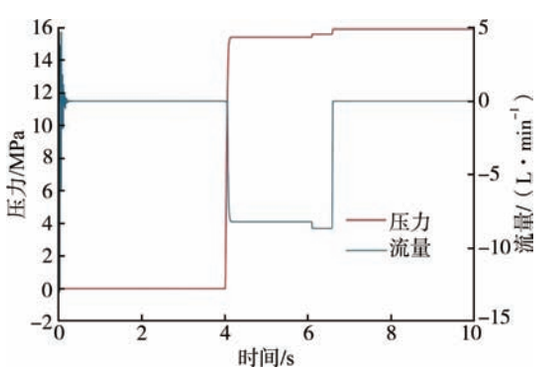


图7 收缩时进口流压特性图

Figure 7 Characteristic diagram of inlet flow pressure during retraction

在机身自重的作用下,起始流量产生波动,波动区间在-6.01~4.71 L/min范围内,0.25 s后趋于稳定;当时间到达4 s时,换向阀开启,液压缸伸出,压力在0.11 s内从0升至15.3 MPa,同时流量在0.11 s内趋于稳定,液压缸正常工作;时间达到6.6 s时,液压杆完全伸出,此时液压缸进口流量清零,进口压力达到最大值,为溢流阀溢流压力。

整个收缩行程中,液压缸进口在换向时工作平稳,没有压力波动以及流量波动,且在收缩动作完成后,整个系统压力流量均为稳定状态,满足频繁换向要求。

3.2.2 液压缸出口流压特性分析

液压缸出口流压特性曲线如图8所示。

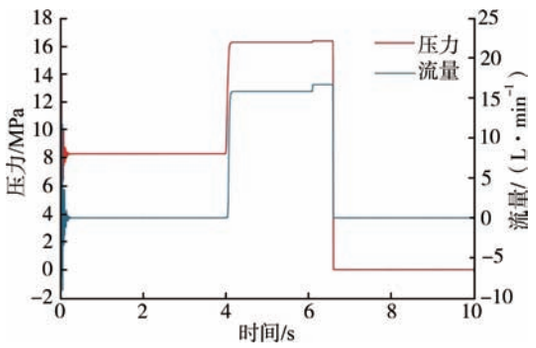


图8 伸出时出口流压特性曲线

Figure 8 Characteristic diagram of outlet flow pressure during retraction

在最初的0.25 s内,由于机身自重影响,压力与流量均为波动收敛。当时间到达4 s时,换向阀换向,流量与压力均在0.11 s内达到稳定工作状态,液压缸完全伸出时,流量与压力清零,与液压缸进口压力类似,在换向时液压缸出口压力与流量均为稳定态,无波动,工作平稳,满足频繁换向要求。

液压缸位移如图9所示,在比例阀全开状态下液压缸位移速度稳定,进口压力与出口压力稳定,最大响应速度为2.54 s,符合频繁启停换向要求。

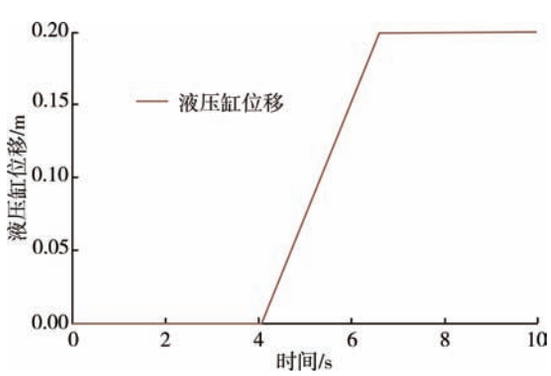


图9 液压缸位移曲线图

Figure 9 Displacement curve of hydraulic cylinder

4 台架试验结果与分析

4.1 试验装置

以4LZ-3.0Z全喂入履带自走式联合收割机为基础,在该机型上改装底盘升降液压系统,包括液压系统、液压控制系统、角度反馈传感器和横向倾角检测传感器。

角度反馈传感器为控制系统提供联合收获机的横向倾角,BW-VG525型超精度动态倾角传感器用于

检测车身的横向倾角，试验用的联合收获机及测量系统如图 10 所示。

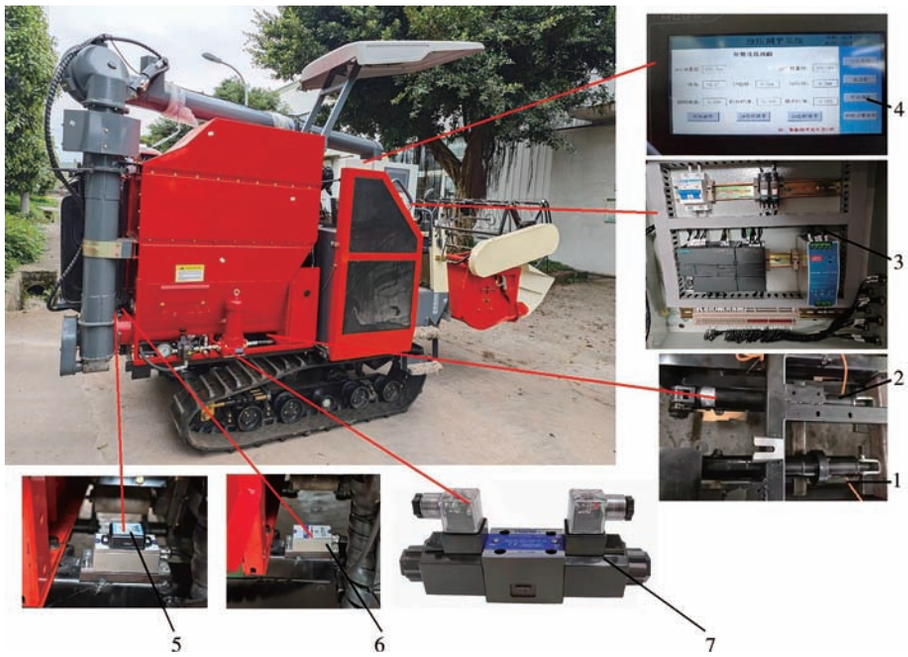


图 10　液压升降系统台架试验图

Figure 10　Bench test of chassis automatic lifting system

1. 位移传感器　2. 液压缸　3. 控制箱　4. 人机交互接口　5. 横向倾角检测传感器　6. 角度反馈传感器　7. 比例换向阀

4.2　试验设计与方法

为测试底盘升降系统的作业性能，开展手动调平液压缸速度和静态调平性能试验。

手动调平液压缸测试试验中，在控制器的触摸屏上设定比例换向阀开度，测试开度为 10%～100%，梯度为 10%。

静态调平性能试验中，将收获机放置于水平地面上，将一侧液压缸伸出至 50 mm、100 mm 和 175 mm，另一侧液压缸保持伸出量为零，开启自动调平功能，底盘开始从倾斜状态自动调节为水平状态，测试自动调平系统在不同倾斜角度条件下自动调平响应时间。

4.3　试验结果分析

4.3.1　液压缸速度调节试验结果

比例换向阀开度对液压缸运动速度的影响见图 11。

比例阀开度为 20%～45% 时，液压缸运动速度与比例换向阀的开度呈线性关系，运动速度随比例换向阀开度增加显著增加，通过控制比例换向阀开度能有效调节液压缸伸缩速度，属于高效控制区间。

当比例阀开度为 45%～100% 时，液压缸运动速度整体平稳，整体变化幅度小。因此，当调节比例换向阀开度范围为 20%～45% 时，能有效控制液压缸伸缩速度。

4.3.2　液压缸速度调节试验结果分析

如图 12 所示，当液压缸伸出 50、100、175 mm 时，底盘初始倾斜角度为 1.6°、2.5°、4.0°、4.9°、6.9°、7.7°，对应的调节时间为 3.6 s、3.9 s、8.1 s、12.9 s、11.7 s、13.2 s，倾斜角度调节误差为 0.37°、0.17°、0.14°、0.21°、0.07°和 0.05°。

随倾斜角度增加，调节时间增加，整体的调节误差低于 0.5°，但在高倾斜角度条件下出现了超调和振荡现象。通过静态试验的测试中，静态下的自动调平系统工作平稳，能在较短时间内将底盘调节至水平状态。

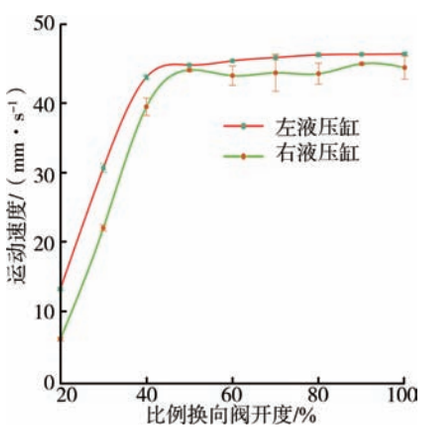
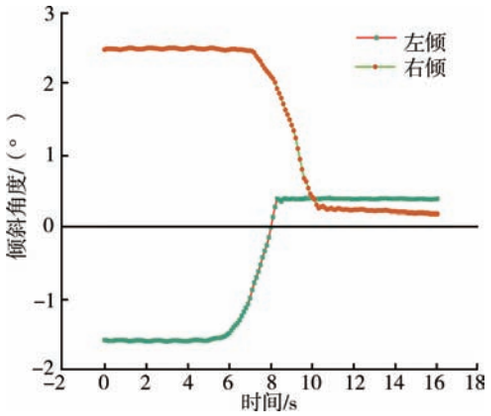
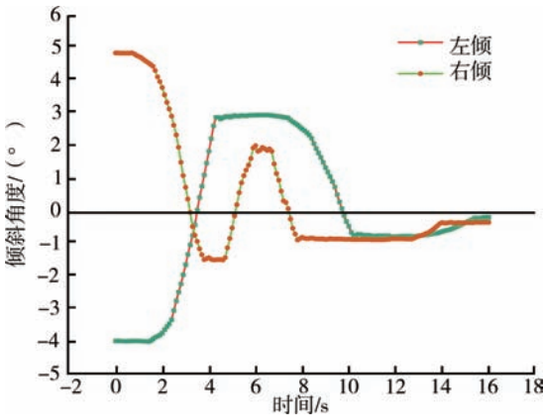


图 11　比例换向阀开度对液压缸运动速度的影响

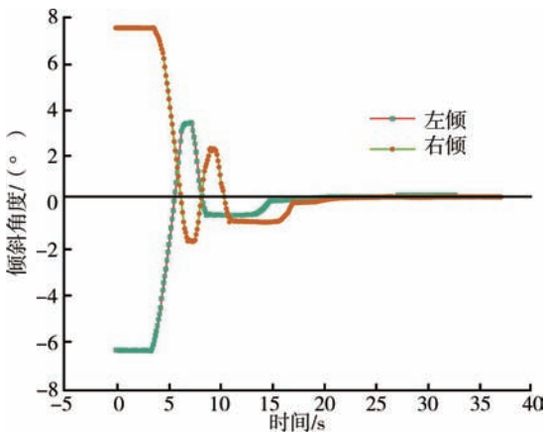
Figure 11　Effect of proportional valve opening on the movement speed of hydraulic cylinders



(a) 液压缸伸出量为 50 mm



(b) 液压缸伸出量为 100 mm



(c) 液压缸伸出量为 175 mm

图 12 静态调平试验结果

Figure 12 Results of static leveling test

5 结论

1) 本研究设计了谷物联合收获机底盘升降液压系统,对内置位移传感器液压缸、比例换向阀等关键部件进行设计和选型,设计的联合收获机底盘根据横向倾斜角度进行调平和升降;可采用自动调平控制和手动调平两种调平模式对底盘进行调平。应用 AMEsim 软件开展液压系统的仿真分析,发现换向时液压缸压力与流量稳定,位移速度平稳。

2) 本研究以 PLC 为控制器,设计了 PID 控制方法调节液压缸长度实现对底盘的姿态调节。静态调平试验表明,比例换向阀开度范围为 20%～45% 时,能有效控制液压缸伸缩速度;调节时间随倾斜角度增加而增加,在 7.7°范围内的总体调节误差低于 0.5°,能满足谷物联合收获机对底盘调平的要求。

3) 该系统已开展田间应用试验,取得了较好的试验效果。但该系统在丘陵区大角度条件下的调平和动力匹配方面需要进一步研究,以适应丘陵区大坡度、深泥脚等作业工况的需求。

参 考 文 献

[1] 金诚谦, 杨腾祥, 刘岗微, 等. 履带式联合收获机全向调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 393－402.
JIN Chengqian, YANG Tengxiang, LIU Gangwei, et al. Design and test of posture controlled chassis for caterpillar combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 393－402.

[2] 王雷, 廖毅, 汪凌, 等. 水田土壤承压模型的建立与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 23－26, 45.
WANG Lei, LIAO Yi, WANG Ling, et al. The establishment and experiments of pressure-sinkage model in paddy field [J]. Journal of Agricultural Mechanizaion Research, 2021, 43(1): 23－26, 45.

[3] 关卓怀, 张敏, 金梅, 等. 履带式农业装备行走机构对土壤的机械破坏研究进展(英文)[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2022, 3(1): 62－70.
GUAN Zhuohuai, ZHANG Min, JIN Mei, et al. Research progress of mechanical damage by walking mechanism of tracked agricultural equipment [J]. Journal of Intelligent

Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2022, 3(1): 62－70.

[4] AHMADI I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances (model development) [J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(5): 339－346.

[5] 孙景彬, 刘志杰, 杨福增, 等. 丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 1－18.
SUN Jingbin, LIU Zhijie, YANG Fuzeng, et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 1－18.

[6] 印祥, 金诚谦. 日本洋马半喂入联合收获机关键技术介绍[J]. 农业工程技术, 2020, 40(3): 43－46.

[7] 久保田“国Ⅳ”EX－M系列全喂入履带收获机[J]. 农业机械, 2023(1): 28－29.

[8] 樊桂菊, 王永振, 张晓辉, 等. 果园升降平台自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 38－46.
FAN Guiju, WANG Yongzhen, ZHANG Xiaohui, et al. Design and experiment of automatic leveling control system for orchards lifting platform [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(11): 38－46.

[9] 杨福增, 牛瀚麟, 孙景彬, 等. 山地履带拖拉机与农具姿态协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 414－422.
YANG Fuzeng, NIU Hanlin, SUN Jingbin, et al. Design and experiment of attitude cooperative control system of mountain crawler tractor and farm tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 414－422.

[10] 张梅红. 车载自动调平液压系统设计及其模糊PID控制分析[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(5): 453－457, 470.
ZHANG Meihong. Design of auto leveling hydraulic system and analysis of fuzzy PID control [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2021, 19(5): 453－457, 470.

[11] 孙永佳, 周军, 李学强, 等. 马铃薯联合收获机车身调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 298－306.
SUN Yongiia, ZHOU Jun, LI Xuegiang, et al. Design and experiment of body leveling system for potato combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 298－306.

[12] 齐文超, 李彦明, 张锦辉, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊PID控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 17－23, 34.
QI Wenchao, LI Yanming, ZHANG Jinhui, et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 17－23, 34.

[13] 赵建柱, 高明远, 马晨旭, 等. 农用底盘主动平衡试验平台与控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 358－364.
ZHAO Jianzhu, GAO Mingyuan, MA Chenxu, et al. Design and experiment on auto leveling system and control strategy for agricultural chassis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 358－364.

[14] 印祥, 安家豪, 王显, 等. 高地隙施药机喷杆自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 98－105, 115.
YIN Xiang, AN Jiahao, WANG Xian, et al. Design and test of automatic beam leveling system for high-clearance spraver [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 98－105, 115.

[15] 杨腾祥, 金诚谦, 蔡泽宇, 等. 履带式联合收割机横向调平底盘设计[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 1－8.
YANG Tengxiang, JIN Chengqian, CAI Zeyu, et al. Design and teveling controlled chassis for track combine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 1－8.

[16] 孙泽宇, 夏长高, 蒋俞, 等. 基于QBP－PID的履带式作业机全向调平控制研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 397－406.
SUN Zeyu, XIA Changgao, JIANG Yu, et al. Omnidirectional leveling control of crawler machine based on QBP－PID [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 397－406.

Design and experiment of chassis automatic lifting hydraulic system for harvester

LEI Xiaolong[1], CHEN Yu[1], LI Ju[1], YANG Ke[1], LIU Cheng[2], YU Xiangyang[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an* 625014, *China*;
2. *Sichuan Jingnong Huizhi Technology Co., Ltd., Chengdu* 610041, *China*)

Abstract: In order to address the issues of large inclination angles and poor pass ability encountered by small-scale combine harvesters operating in hilly regions, a design and experimental study were conducted on an automatic lifting hydraulic system for the combine's chassis. This research developed the overall structure of the automatic lifting hydraulic system for the chassis, designed and selected key components such as hydraulic cylinders with built-in displacement sensors and directional proportional valves, and proposed methods for leveling and lifting the chassis by extending or retracting the hydraulic cylinders based on the transverse inclination angle. The study employed two leveling modes: automatic and manual, to level the chassis. The hydraulic system was simulated using AMEsim software, revealing stable pressure and flow within the hydraulic cylinders during direction reversing, along with smooth displacement velocity. A leveling control strategy centered on a PLC controller and PID control method was designed, which adjusted the length of the hydraulic cylinders to regulate the chassis's attitude and to conduct a static leveling experiment. Results indicated the proportional directional valve, when adjusted to a position between 20% and 45%, it can effectively regulate the velocity of both the extension and retraction movements of the hydraulic cylinders. The adjustment time increased with larger inclination angles, but the overall adjustment error remained below 0.5° within an inclination range of 7.7°, which can meet the requirements for transverse leveling of the combine harvester's chassis. This research introduced a hydraulic system and control method to realize leveling based on the transverse angle, providing a reference for the design of the chassis leveling hydraulic system for small-scale combine harvesters.

Keywords: grain combine harvester; chassis leveling; hydraulic system; electro-hydraulic control method; proportional directional valve