

丘陵履带式甘蔗收获机底盘调平机构设计与试验

赖晓^{1,2} 程健华¹ 李尚平^{1,2} 文春明² 韦雨彤² 宋家华²

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 广西民族大学电子信息学院, 南宁 530006)

摘要: 针对履带式甘蔗收获机在横向斜坡的丘陵山地作业时容易侧翻问题,设计了一种适用于履带式甘蔗收获机的底盘调平机构。基于履带式甘蔗收获机中间有甘蔗输送通道的特点,提出了两侧设置调平机构的方案。开展了底盘调平机构关键部件参数设计和各调整油缸受力分析。根据相似性原理搭建缩小比例的试验平台,对试验平台进行了横向倾翻分析和横向姿态调整试验。理论计算和试验结果表明,横向调整后横向倾翻角比调整前横向倾翻角大,横向倾翻角得到提升,调平底盘可以有效改变整机质心,在一定程度上提升了整机横向稳定性。横向倾翻试验中,调整前横向倾翻角为 24.31° ,横向调整后横向倾翻角为 27.52° ,横向调整后横向倾翻角提高13.20%。横向姿态调整试验结果表明,横向调整角最大 10° ,调整时间为1 s,调整精度在 0.5° 以内,验证了机构横向姿态调整的可行性。在底盘调平机构初始状态,调整油缸所受负载最大值为871.61 N,换算成样机所需推力为55 783.04 N。

关键词: 履带式甘蔗收获机; 丘陵山地; 底盘调平机构

中图分类号: S225.5⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0100-10

OSID:



Design and Experiment of Chassis Levelling Mechanism and Test of Hilly Tracked Sugarcane Harvester

LAI Xiao^{1,2} CHENG Jianhua¹ LI Shangping^{1,2} WEN Chunming² WEI Yutong² SONG Jiahua²

(1. School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. School of Electronic Information, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China)

Abstract: Aiming at the problem that the tracked sugarcane harvester has the risk of overturning when it worked in hilly mountainous areas with lateral slope, a chassis levelling mechanism suitable for tracked sugarcane harvesters was designed. Based on the characteristics of the tracked sugarcane harvester with a sugarcane conveying channel in the middle, the scheme of the double-sided levelling mechanism was proposed. The parameter design of the key components of the chassis levelling mechanism and the force analysis of each adjustment cylinder were carried out. A scaled-down test platform was constructed according to the principle of similarity, and lateral tipping analysis and lateral adjustment tests were carried out on the test platform. From the theoretical calculations and test analyses, the lateral tipping angles after lateral adjustment were larger than those before adjustment, and the lateral tipping angle was improved, the centre of mass of the whole machine can be effectively changed. The results of the lateral tipping test showed that the lateral tipping angle before adjustment was 24.31° , and the lateral tipping angle after lateral adjustment was 27.52° , which was 13.20% higher than that before adjustment after lateral adjustment. The lateral attitude adjustment test showed that the maximum lateral adjustment angle was 10° , the adjustment time was 1 s, and the adjustment accuracy was within 0.5° , the research result showed that the chassis levelling mechanism could validate the function of lateral attitude adjustment. In the initial state, the adjustment cylinder were subjected to the largest load, and the maximum value was 871.61 N, which was converted into the thrust required by the prototype machine was 55 783.04 N.

Key words: tracked sugarcane harvester; hilly mountainous terrain; chassis levelling mechanism

收稿日期: 2024-08-06 修回日期: 2024-10-11

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA22117006)、广西自然科学基金项目(2022GXNSFAA035549)和广西民族大学科研基金项目(2024KJQD12)

作者简介: 赖晓(1979—),女,讲师,博士,主要从事计算机辅助设计与制造研究,E-mail: dawnlx1979@126.com

通信作者: 李尚平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事甘蔗生产机械设计研究,E-mail: spli501@vip.sina.com

0 引言

我国甘蔗主要种植在广西、广东、云南等省区,甘蔗糖产量占食糖产量80%以上,是重要的食糖来源^[1]。许多蔗地比较分散、小块,且有一定的坡度,实现机械化生产难度大^[2-3]。农业机械在斜坡行驶及作业时容易发生倾翻^[4-6],作业过程中需实现姿态调平来提高农业机械安全性及作业质量^[7]。在坡地水资源缺乏地区,甘蔗一般沿着等高线种植^[8-9],蔗垄一边高一边低,甘蔗种植行距窄。因标准甘蔗种植行距和机器零件高度分布的限制,履带式甘蔗收获机横向宽度窄,重心高,履带式甘蔗收获机在横向斜坡的丘陵蔗地上作业时,容易横向侧翻。

国内外学者在农业机械底盘调平和防侧翻方面开展了相关研究。文献[10-11]基于四点调平原理,设计了具有全向调平功能的底盘。BALLESTEROS等^[12]设计了一种拖拉机自动防翻滚保护系统,该系统能提高拖拉机稳定性。PIJUAN等^[13]设计了一种底盘悬架,通过调节悬架高度实现车身姿态调整。孙景彬等^[14]设计了一种平行四杆机构和双车架机构组合的调平底盘,能实现山地履带拖拉机在横向斜坡和纵向斜坡全向调平。文献[15-17]基于平行四边形原理,设计了横向姿态调整底盘。张开兴等^[18]设计了一种轮式丘陵山地拖拉机扭腰姿态调整装置,该装置通过调整前轮和后轮相对转动角实现在横向斜坡调平。刘平义等^[19-21]设计了多种适用于丘陵山地底盘的可调悬架,可通过调整悬架高度平衡车体姿态变化。蒋俞等^[22]设计了一种基于“三层车架”的全向调平结构方案,层与层之间可实现单方向的姿态调整。韩振浩等^[23-24]设计了一种重心自适应调控的山地果园运输车,通过调整重心位置提高坡地通过性能。另外,在调平控制算法方面,文献[25-29]在传统算法上进行改进,提升底盘调平性能。目前,在农业机械领域,对轮式拖拉机、履带式联合收获机调平技术研究较多,对于履带式甘蔗收获机调平技术研究比较少。轮式前后绕轴转动方式并不能适用于中间有输送通道的履带式甘蔗收获机,多层机架组合方式会导致重心过高,现有调平机构并不能很好适用于履带式甘蔗收获机。

基于履带式甘蔗收获机中间有甘蔗输送通道特点,考虑整体质心不宜过高的要求,本文设计一种两侧设置的底盘调平机构,避开中间甘蔗输送通道,整体结构紧凑,空间利用小。通过调整车架两侧的高度差实现车架横向调平,以避免履带式甘蔗收获机

在等高线作业时横向侧翻。

1 横向调平底盘结构组成与工作原理

1.1 结构组成

底盘调平机构主要由履带行走系、曲柄滑块机构、辊轮槽、滚珠滑块机构、车架、甘蔗输送通道组成,如图1所示。曲柄滑块机构主要由调整油缸、辊轮、曲柄组成,左右对称布置在履带行走系。曲柄下端与履带行走系铰接,上端与辊轮铰接,中间与调整油缸铰接。调整油缸另一端与履带行走系铰接。滚珠滑块机构主要由导轨、滚珠滑块、导槽板组成,车架两侧均设有滚珠滑块机构。导轨固定安装在辊轮槽内部上表面,导轨长度方向和辊轮槽宽度方向平行。导轨与滚珠滑块配合连接,两者可相互直线运动。导槽板与滚珠滑块固定连接。导槽板两侧有突耳,突耳内侧卡住辊轮的侧面。辊轮槽前后两端均设有沿轴线前后方向分布的转轴,车架上固定安装有滑动轴承,辊轮槽转轴与车架滑动轴承铰接,车架两侧均设有辊轮槽。

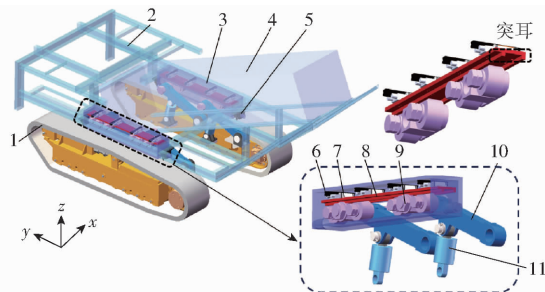


图1 底盘调平机构结构图

Fig. 1 Structure diagram of chassis leveling mechanism

1. 履带行走系 2. 车架 3. 辊轮槽 4. 甘蔗输送通道 5. 滑动轴承 6. 导轨 7. 滚珠滑块 8. 导槽板 9. 辊轮 10. 曲柄 11. 调整油缸

1.2 工作原理

根据底盘调平机构结构组成可知,曲柄滑块机构中的调整油缸推动曲柄旋转,可提高或者降低车架高度,车架有 z 轴(高度)方向的移动自由度。曲柄滑块机构辊轮可在辊轮槽长度方向滚动,车架有 y 轴(前后)方向移动自由度;左右两侧辊轮槽内部均设有沿 x 轴方向的滚珠滑块机构,曲柄滑块机构相对于地面静止,导槽板突耳卡住辊轮两侧,导槽板在 x 轴方向和辊轮相对静止,车架可在导轨与滚珠滑块配合方向移动,车架有 x 轴(左右)方向移动自由度;车架可绕辊轮槽两端轴转动,车架有绕 y 轴转动自由度。

图2为底盘调平机构工作原理图,调整油缸伸长驱动曲柄旋转,车架一侧升高,调整油缸未动作一侧车架高度不变,车架两侧形成高度差。车架一侧

升高的过程中绕着另一侧辊轮槽两端的轴翻转,在翻转过程中滚珠滑块机构导轨和滑块会发生相对移动(滑动轴承固定安装在车架上,安装距离为固定值,当形成一定夹角时,左右滑动轴承横向距离缩短),车架与地面角度发生变化。当车架翻转调整角度等于斜坡角时,履带式甘蔗收获机在斜坡上横向调平。

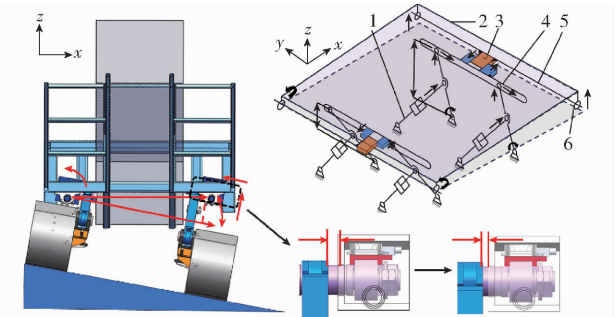


图 2 底盘调平机构工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of chassis leveling mechanism

1. 曲柄滑块机构 2. 车架 3. 滚珠滑块机构 4. 导槽板 5. 辊轮槽 6. 滑动轴承

2 调平参数

2.1 底盘调平机构运动学分析

调整油缸伸缩驱动曲柄旋转,曲柄滑块机构高度发生变化,车架绕轴翻转,完成车架横向姿态调整。现对底盘调平机构进行运动学分析,通过计算得到横向调整角与调整油缸伸长量之间的关系。

由图 3 可知,调整前曲柄上铰支点到下铰支点垂直距离为 H_0 ,调整后曲柄上铰支点到下铰支点垂直距离为 H_1 。单侧调整油缸动作,车架左右两侧形成高度差 ΔH 为

$$\Delta H = H_1 - H_0 \quad (1)$$

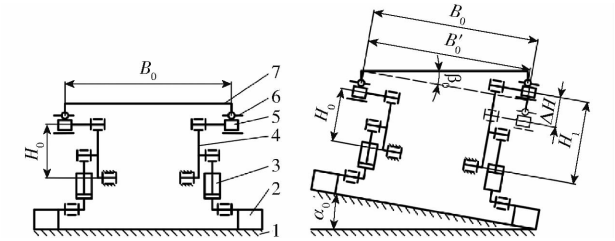


图 3 横向调平原理图

Fig. 3 Scheme of transverse levelling

1. 地面 2. 履带行走系 3. 调整油缸 4. 曲柄 5. 滚珠滑块机构 6. 辊轮槽 7. 车架

横向调整角 β_0 与两侧曲柄滑块机构高度关系为

$$\beta_0 = \arcsin \frac{\Delta H}{B_0} = \arcsin \frac{H_1 - H_0}{B_0} \quad (2)$$

式中 B_0 ——车架左右两轴承安装距离,mm

根据式(2)可知,当调整一侧曲柄滑块机构高度时,横向调整角也随之变化。当横向调整角 β_0 等于斜坡角 α_0 时,车身横向调平。

曲柄滑块机构位置调整关系如图 4 所示。

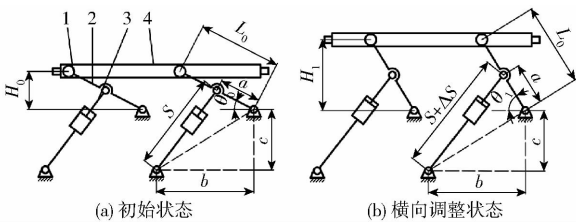


图 4 曲柄滑块机构位置调整关系

Fig. 4 Relationship diagram of crank slider mechanism

1. 辊轮 2. 曲柄 3. 调整油缸 4. 辊轮槽

图 4a 为曲柄滑块机构初始状态,调整前曲柄上铰支点到下铰支点垂直距离为

$$H_0 = L_0 \sin \theta_0 \quad (3)$$

其中

$$\theta_0 = \arccos \frac{a^2 + b^2 + c^2 - S^2}{2a \sqrt{b^2 + c^2}} - \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{b}{c} \right) \quad (4)$$

式中 L_0 ——曲柄长度,mm

a ——调整油缸有杆端铰接处到曲柄下端铰接处距离,mm

b ——调整油缸无杆端铰接处到曲柄下端铰接处水平距离,mm

c ——调整油缸无杆端铰接处到曲柄下端铰接处竖直距离,mm

S ——调整油缸初始安装长度,mm

θ_0 ——初始状态曲柄水平夹角, ($^\circ$)

整理得调整前曲柄上铰支点到下铰支点垂直距离与调整油缸长度关系为

$$H_0 = L_0 \sin \left(\arccos \frac{a^2 + b^2 + c^2 - S^2}{2a \sqrt{b^2 + c^2}} - \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{b}{c} \right) \right) \quad (5)$$

图 4b 为曲柄滑块机构横向调整状态,调整后曲柄上铰支点到下铰支点的垂直距离为

$$H_1 = L_0 \sin \theta_1 \quad (6)$$

其中

$$\theta_1 = \arccos \frac{a^2 + b^2 + c^2 - (S + \Delta S)^2}{2a \sqrt{b^2 + c^2}} - \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{b}{c} \right) \quad (7)$$

式中 ΔS ——调整油缸伸长量,mm

θ_1 ——横向调整后曲柄水平夹角, ($^\circ$)

整理得调整后曲柄上铰支点到下铰支点的垂直距离与调整油缸长度关系为

$$H_1 = L_0 \sin \left(\arccos \frac{a^2 + b^2 + c^2 - (S + \Delta S)^2}{2a \sqrt{b^2 + c^2}} - \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{b}{c} \right) \right) \quad (8)$$

联立式(2)、(5)、(8),可得

$$\beta_0 = \arcsin \left(\frac{L_0 \sin \left(\arccos \frac{a^2 + b^2 + c^2 - (S + \Delta S)^2}{2a \sqrt{b^2 + c^2}} - \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{b}{c} \right) \right)}{B_0} - \frac{L_0 \sin \left(\arccos \frac{a^2 + b^2 + c^2 - S^2}{2a \sqrt{b^2 + c^2}} - \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{b}{c} \right) \right)}{B_0} \right) \quad (9)$$

由式(9)可知,当 a 、 b 、 c 、 L_0 、 S 、 B_0 确定时,横向调整角 β_0 只与调整油缸伸长量 ΔS 有关,通过传感器获取调整油缸位移,可得车架横向调整角。

本设计综合考虑履带式甘蔗收获机实际尺寸、甘蔗垄距、甘蔗垄高、整机质心高度不宜过高、横向极限调整角 10° 的要求,确定 $a = 235 \text{ mm}$ 、 $b = 550 \text{ mm}$ 、 $c = 340 \text{ mm}$ 、 $L_0 = 480 \text{ mm}$ 、 $S = 560 \text{ mm}$ 、 $B_0 = 1\,404 \text{ mm}$ 、 ΔS 最大值为 180 mm 。代入式(5)、(8)得到 H_0 为 214.6 mm 、 H_1 为 458.4 mm 。

2.2 曲柄滑块机构受力分析

如图 5 所示,曲柄滑块机构上端的辊轮作为支撑点承载着整个车架及其装载的零件,调整油缸提供驱动力驱动曲柄旋转。对曲柄滑块机构进行受力分析,计算辊轮支撑点受力及调整油缸所需推力。当横向调平底盘放置在倾斜角为 γ 的斜坡时,以车架质心在曲柄滑块机构上端 4 个辊轮圆心所组成平面上的投影点作为坐标原点,车架中心平面与曲柄滑块机构上端 4 个辊轮圆心所组成平面的交线作为 y 轴,在曲柄滑块机构上端 4 个辊轮圆心所组成的平面内并且垂直 y 轴的直线作为 x 轴,垂直于曲柄滑块机构上端 4 个辊轮圆心所组成的平面的直线作为 z 轴,建立笛卡尔空间坐标系。

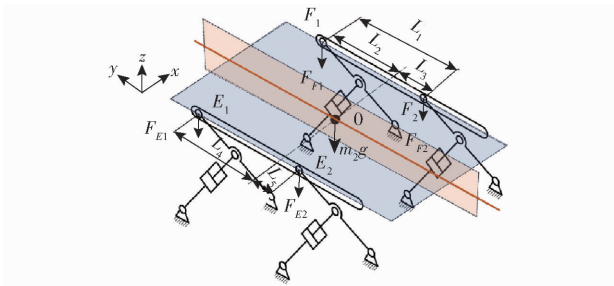


图 5 整体受力分析图

Fig. 5 Diagram of total force analysis

曲柄滑块机构上端 4 个辊所受重力分别为 F_{F1} 、 F_{F2} 、 F_{E1} 和 F_{E2} ,根据空间力系可得

$$\begin{cases} \sum F_z = F_{F1} + F_{F2} + F_{E1} + F_{E2} - m_2 g \cos \gamma = 0 \\ \sum M_x = L_2 F_{F1} - L_3 F_{F2} + L_4 F_{E1} - L_5 F_{E2} = 0 \\ \sum M_y = 0.5 B_0 F_{F1} + 0.5 B_0 F_{F2} - 0.5 B_0 F_{E1} - 0.5 B_0 F_{E2} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据约束条件可得

$$\begin{cases} F_{F1} + F_{F2} = 0.5 m_2 g \cos \gamma \\ F_{E1} + F_{E2} = 0.5 m_2 g \cos \gamma \\ L_2 F_{F1} - L_3 F_{F2} = 0 \\ L_4 F_{E1} - L_5 F_{E2} = 0 \\ L_2 + L_3 = L_4 + L_5 = L_1 \end{cases} \quad (11)$$

整理得各个辊轮支撑点所受负载为

$$\begin{cases} F_{F1} = \frac{L_3 m_2 g \cos \gamma}{2L} \\ F_{F2} = \frac{L_2 m_2 g \cos \gamma}{2L} \\ F_{E1} = \frac{L_5 m_2 g \cos \gamma}{2L} \\ F_{E2} = \frac{L_4 m_2 g \cos \gamma}{2L} \end{cases} \quad (12)$$

- 式中
- m_2 ——车架及其装载零件总质量,kg
 - L_1 ——曲柄滑块两辊轮距离,mm
 - L_2 ——点 F_1 到车架质心距离,mm
 - L_3 ——点 F_2 到车架质心距离,mm
 - L_4 ——点 E_1 到车架质心距离,mm
 - L_5 ——点 E_2 到车架质心距离,mm

对单个曲柄滑块机构进行受力分析,如图 6 所示,计算单个调整油缸所需推力 F_Q 与单个曲柄滑块机构所受负载 w 的关系。

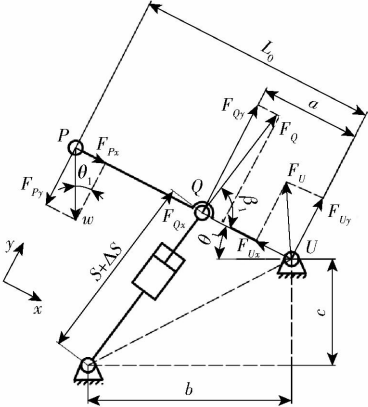


图 6 曲柄滑块机构受力分析

Fig. 6 Force analysis diagram of crank slider mechanism

将单个曲柄受力点坐标轴分解, F_Q 可分解为 F_{Qx} 、 F_{Qy} , w 可分解为 F_{Px} 、 F_{Py} , 曲柄下铰支点与反力 F_U 可分解为 F_{Ux} 、 F_{Uy} 。根据平面力系可得

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{Px} + F_{Qx} - F_{Ux} = 0 \\ \sum F_y = F_{Qy} + F_{Uy} - F_{Py} = 0 \\ \sum M_U = F_{Qy}a - F_{Py}L_0 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中 $F_{Py} = w \cos \theta_1$ $F_{Qy} = F_Q \sin \beta_1$

$$\theta_1 = \arccos \frac{a^2 + b^2 + c^2 - (S + \Delta S)^2}{2a\sqrt{b^2 + c^2}} - \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \frac{b}{c} \right)$$

$$\beta_1 = \pi - \arccos \frac{a^2 + b^2 + c^2 - (S + \Delta S)^2}{2a\sqrt{b^2 + c^2}}$$

式中 β_1 ——调整油缸与曲柄夹角, (°)
整理得单个调整油缸推力 F_Q 与负载 w 关系为

$$F_Q = \frac{wL_0 \cos \theta_1}{a \sin \beta_1} \quad (14)$$

由式(12)可得各个轮轮支撑点所受负载,将各个轮轮支撑点所受负载代入式(14)可得每个调整油缸所需推力,调整油缸选型时,推力应满足

$$F_Q \geq k \frac{wL_0 \cos \theta_1}{a \sin \beta_1} \quad (15)$$

式中 k ——安全系数

2.3 液压系统组成

履带式甘蔗收获机主要依靠液压驱动,图7为底盘调平机构的液压系统原理图。底盘调平机构液压系统主要由油箱、液压泵、过滤器、溢流阀、三位四通电磁换向阀、单向节流阀、双液控单向阀、分流集流阀、调整油缸组成。液压泵的作用在于给整个液压系统提供液压油,可通过单向节流阀手动调节流量,从而调整油缸伸缩速度,双液控单向阀起到调整

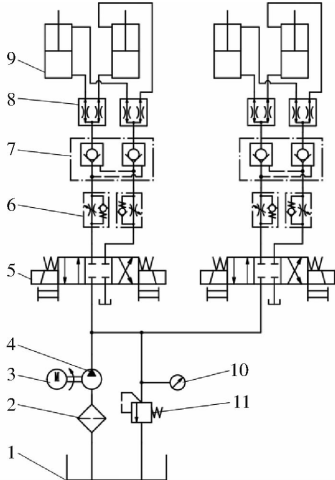


图7 底盘调平机构液压系统原理图

Fig.7 Schematic of hydraulic system of chassis levelling mechanism

1. 油箱 2. 过滤器 3. 三相异步电机 4. 液压泵 5. 三位四通电磁换向阀 6. 单向节流阀 7. 双液控单向阀 8. 分流集流阀
9. 调整油缸 10. 压力表 11. 溢流阀

油缸双向断电保压的作用,分流集流阀作用是使两个调整油缸同步伸长缩短。

当传感器检测到车身倾斜时,控制液压泵启动,根据调平原理升高或者降低车架一侧高度。当三位四通电磁换向阀得电居于左位,调整油缸无杆腔进油,有杆腔出油,在分流阀作用下使单侧曲柄滑块机构两个调整油缸同步伸长,提升单侧车架高度。当三位四通电磁换向阀得电居于右位,调整油缸有杆腔进油,无杆腔出油,在分流阀作用下使单侧曲柄滑块机构两个调整油缸同步缩短,降低单侧车架高度。

3 试验

3.1 试验平台

改装原有机型,履带式甘蔗收获机如图8所示。整体为液压传动,配套动力140 kW,整机质量7 t。



图8 履带式甘蔗收获机

Fig.8 Tracked sugarcane harvester

为了验证设计可靠性,根据相似性原理,在实验室内搭建按照与实际机器设计尺寸比例4:1的试验平台,如图9所示。

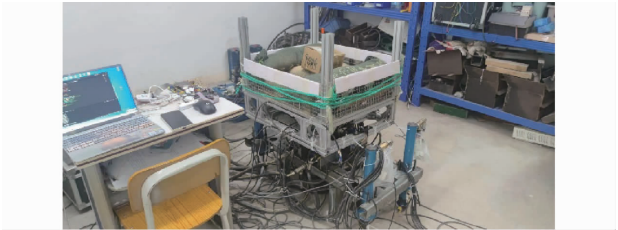


图9 试验平台

Fig.9 Test platform

试验平台整体长度1 000 mm,宽度500 mm,高度658.5 mm,总质量为195.37 kg,上端装载109 kg重物(车架及其重物总质量,即实际样机载重7 t,按照与样机满载量比例64:1缩小装载量)。试验平台曲柄长度120 mm,主要由空心矩形管制造,横截面长35 mm,宽10 mm,壁厚2.5 mm(最大正应力在横截面上距中性轴最远处,最大正应力在材料许用应力范围内,其余各点正应力均小于许用应力,材料外圈承载大部分应力,为了节约材料成本及减重,曲柄采用空心矩形管)。滚珠滑块型号为MGN12C,长34 mm,宽27 mm,高13 mm,基本额定动载荷

2.84 kN,基本额定静载荷 3.92 kN。调整油缸初始长度 140 mm,调整油缸行程 45 mm,最大调平角度 10°,试验平台按照实际设计尺寸缩小。甘蔗收获机原型设计尺寸和试验平台设计尺寸对比如表 1 所示。底座 4 个角安装底座调整油缸,通过底座调整油缸可改变底座和安装在底座上面机构角度,简单模拟路面横向角变化。

表 1 甘蔗收获机原型设计尺寸和试验平台设计尺寸对比
Tab.1 Comparison of design dimensions of sugarcane harvester and design dimensions of test bench

参数	甘蔗收获机	试验平台
曲柄长度/mm	480	120
曲柄横截面尺寸(长×宽×厚度)/(mm×mm×mm)	140×40×10	35×10×2.5
基本载荷/kg	7 000	109
调整油缸初始长度/mm	560	140
调整油缸行程/mm	180	45
最大调平角/(°)	10	10

为了测量车架和底座角度变化,车架和底座分别安装 WT901C 型三轴姿态传感器,可同时测量 x 、 y 、 z 轴角度,动态精度为 0.1°。计算机也外接 2.8 寸 TFTLCD 液晶屏,可实时观察车架和底座角度变化。为了测量调整油缸位移,选用 E6B2 型拉线位移传感器,安装在调整油缸侧面,量程为 0 ~ 1 000 mm,线性精度 0.1%。同时,为了获取调整油缸压力,在调整油缸进油口安装 PT210B 型压力变送器,量程 0 ~ 2.5 MPa,综合精度 0.25%。

3.2 横向倾翻

当履带式甘蔗收获机静止在横坡时,车架和履带行走系可视为刚体,建立履带式甘蔗收获机横向倾翻模型,如图 10 所示。

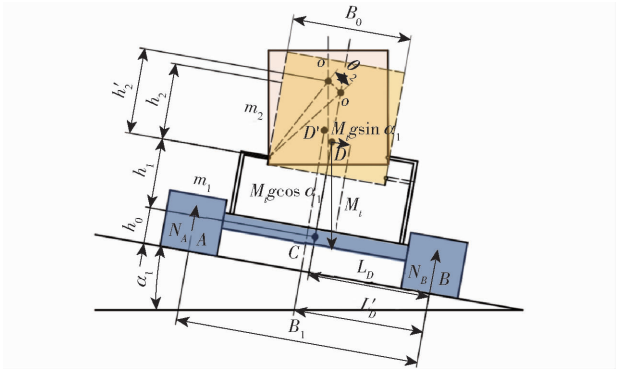


图 10 横向倾翻受力分析图

Fig. 10 Diagram for analysis of lateral overturning forces

车架横向调整前,履带式甘蔗收获机整体质心为点 D ,车架质心在点 o ,底盘质心在点 C 。

履带行走系统质量为 m_1 ,其装载零件质量为 m_2 ,可得整机质量为

$$M_t = m_1 + m_2 \tag{16}$$

横向调整前整机质心高度为

$$h_D = h_0 + \frac{m_2(h_1 + h_2)}{M_t} \tag{17}$$

横向调整前整机质心到点 B 横向距离为

$$L_D = 0.5B_1 \tag{18}$$

对履带支撑点 B 取矩,平衡方程为

$$M_t g L_D \cos \alpha_1 - M_t g h_D \sin \alpha_1 - N_A B_1 = 0 \tag{19}$$

当 $N_A = 0$,履带式甘蔗收获机将发生倾翻,横向倾翻角为

$$\alpha_1 = \arctan \frac{L_D}{h_D} \tag{20}$$

式中 h_0 ——底盘质心高度,mm
 h_1 ——底盘质心到车架轴高度,mm
 h_2 ——横向调整前车架轴到车架质心高度,mm
 α_1 ——横向调整前横向倾翻角,(°)
 B_1 ——履带轨距,mm
 N_A ——点 A 履带支撑力,N

当车架调整一定角度 θ_2 时,整机质心变化到点 D' 。此时,车架轴到车架质心高度将发生变化,调整一定角度后车架轴到车架质心高度为

$$h'_2 = h_2 \cos \theta_2 + 0.5B_0 \sin \theta_2 \tag{21}$$

横向调整后整机质心高度为

$$h'_D = h_0 + \frac{m_2(h_1 + h'_2)}{M_t} = h_0 + \frac{m_2(h_1 + h_2 \cos \theta_2 + 0.5B_0 \sin \theta_2)}{M_t} \tag{22}$$

横向调整后整机质心到点 B 横向距离为

$$L'_D = 0.5B_1 + \frac{m_2(0.5B_0 - 0.5B_0 \cos \theta_2 + h_2 \sin \theta_2)}{M_t} \tag{23}$$

当履带式甘蔗收获机侧翻时,点 A 离开地面,此时 $N_A = 0$,横向调整后横向倾翻角为

$$\alpha'_1 = \arctan \frac{L'_D}{h'_D} \tag{24}$$

底座和底座调整油缸总质量为 86.37 kg,质心高度为 233.50 mm;车架及其重物质量为 109 kg,质心距离车架轴高度为 219.93 mm;底盘质心到车架轴高度为 193.03 mm;左右底座调整油缸跨距 400 mm,左右轴承距离为 351 mm。

当试验平台在初始状态时,将数据代入式(17)、(18)、(20)可得调整前横向倾翻角为 23.32°。当试验平台车架调整 10°(试验平台最大设计调整角)时,将数据代入式(22) ~ (24)可得调整后横向倾翻角为 24.94°。

如图 11 所示,利用试验平台进行横向倾翻试

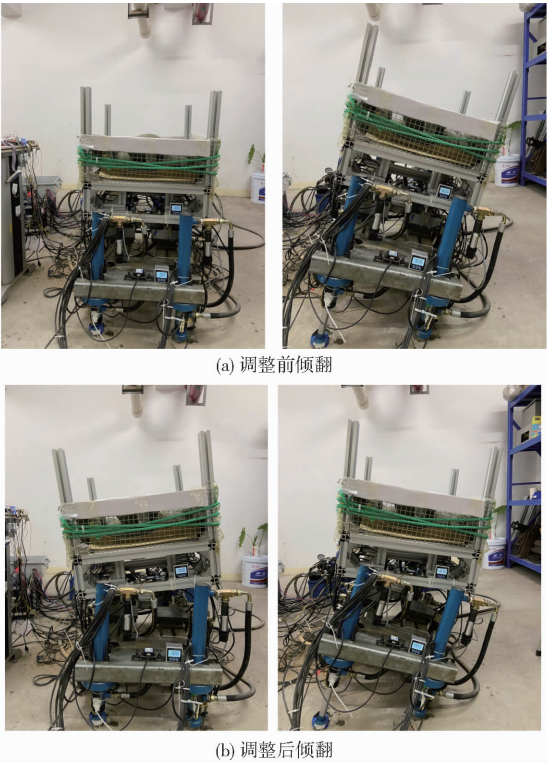


图 11 横向倾翻试验
Fig. 11 Lateral tipping test

验,测量调整前和横向调整后横向倾翻角。如图 11a 所示,调整前横向倾翻角试验开始前,先将底座和车架角度调整到初始状态。在此基础上使底座一侧的底座调整油缸缸杆伸出,直至试验平台出现失稳现象。如图 11b 所示,横向调整后横向倾翻角试验开始前,先将底座和车架角度调整至极限夹角状态,在此基础上使底座一侧的底座调整油缸缸杆伸出,直至试验平台出现失稳现象。调整前横向倾翻角试验和横向调整后横向倾翻角试验记录整个过

程底座角度和左右底座调整油缸压力,失稳时角度为横向倾翻角。

在整个倾翻过程,左侧底座调整油缸不断伸长,试验平台整体往右倾倒。由图 12a、12b、12d、12e 可以看到,在倾翻过程中,左侧底座调整油缸压力基本保持不变,随着质心不断往右偏移,右侧底座调整油缸压力逐渐升高。当临界倾翻时,左侧离地,负载为 0,左侧底座调整油缸缸杆迅速缩回,压力迅速变为 0。当左右底座调整油缸压力突变时的底座角度为横向倾翻角。

由图 12c、12f 可知,底盘角度突变时对应的角度为横向倾翻角,调整前横向倾翻角为 24.31° ,横向调整后横向倾翻角为 27.52° ,横向调整后比调整前提高 13.20%。横向调整后调平底盘可有效改变整机质心,在一定程度上提升了整机横向稳定性。

理论计算和试验结果表明,横向调整后横向倾翻角比调整前横向倾翻角大,横向倾翻角得到提升。调整前横向倾翻角理论值与试验值相对误差为 4.25%,横向调整后横向倾翻角理论值与试验值相对误差为 10.34%。

3.3 横向姿态调整试验

为了测试横向姿态调整可行性和获取横向姿态调整过程中调整油缸推力、位移、车架角度和调整时间数据,进行横向调整试验。

如图 13 所示,横向姿态调整试验前,先将底座和车架的角度调整到水平初始状态,此时底座和车架基本平行。在此基础上使左侧调整油缸缸杆伸出,车架左侧升高,车架横向姿态调整。记录此时车架角度变化、调整油缸压力和调整油缸缸杆位移,根据调整油缸压力乘以活塞杆面积可计算曲柄调整油缸推力。

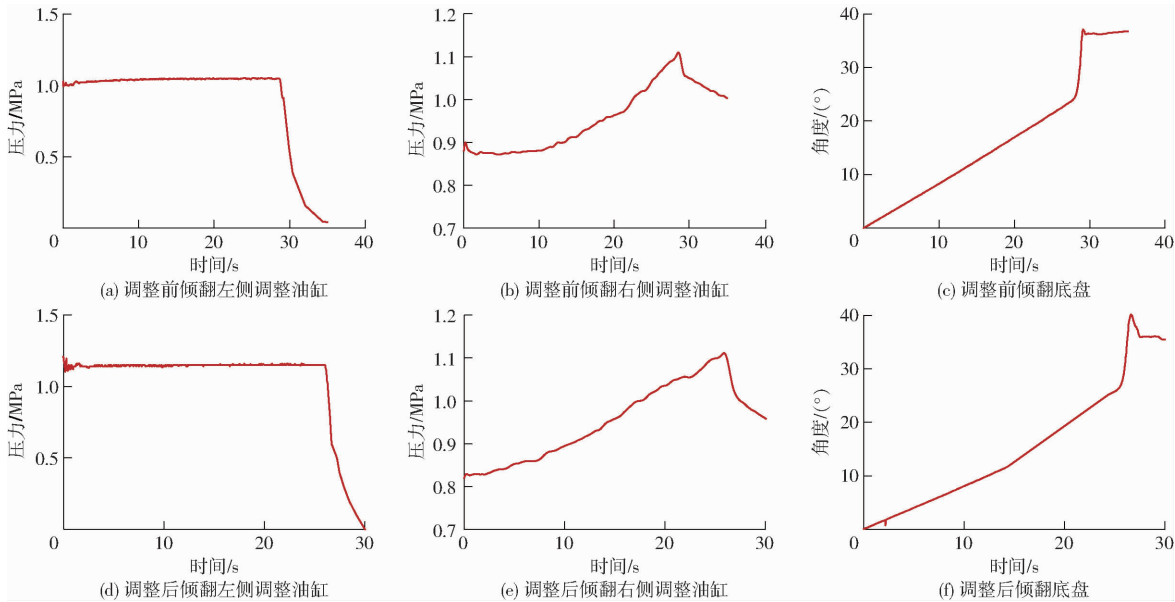


图 12 横向倾翻试验结果
Fig. 12 Results of lateral tilt test

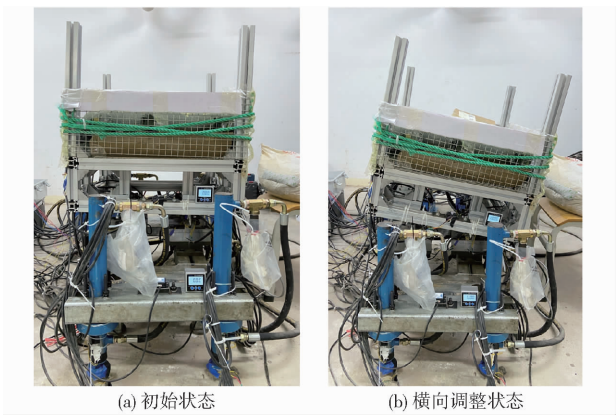


图 13 横向姿态调整试验
Fig. 13 Test for lateral adjustment

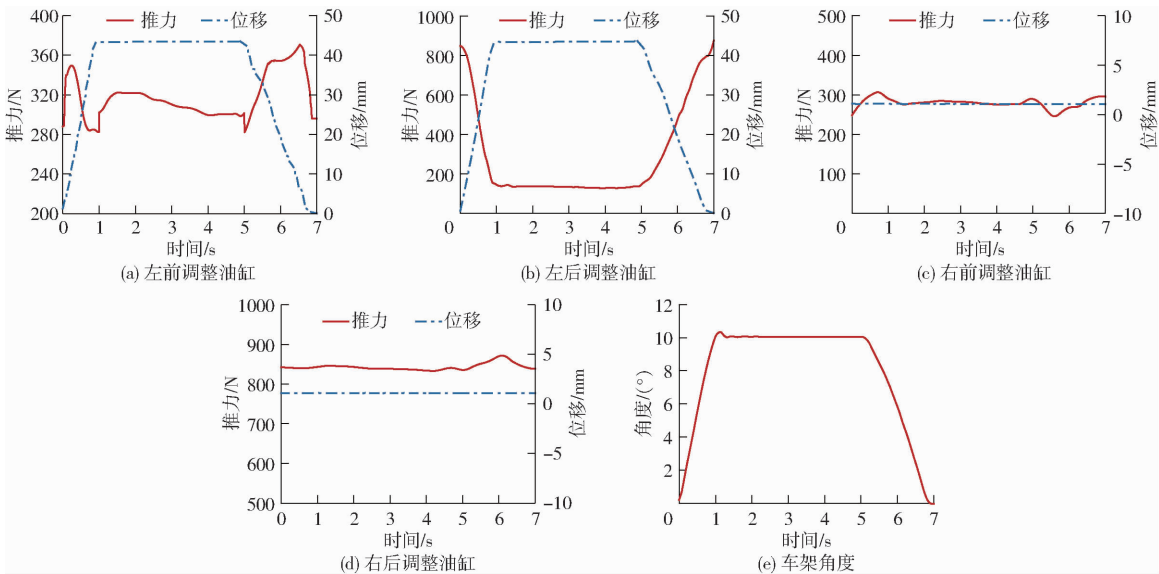


图 14 横向姿态调整试验结果
Fig. 14 Plots of results of lateral adjustment test

推力为 847.81 N,姿态横向调整过程不断减小,车架与底盘之间夹角达到 10°时,推力在 132.23 ~ 143.96 N 之间波动。在回到初始位置过程中不断增大,回到初始位置时为 875.62 N。如图 14c、14d 所示,右前和右后调整油缸没有运动,右前调整油缸推力在 247.55 ~ 306.70 N 之间波动,右后调整油缸推力在 842.50 ~ 871.61 N 之间波动。

由图 14 可知,横向调平底盘能实现最大 10°的横向调整,调整精度 0.5°。上升时间为 1 s,回到初始状态 2 s,基本满足设计要求。底盘调平机构初始状态调整油缸所受负载最大,最大值为 871.61 N,换算成样机所需推力为 55 783.04 N。

4 结论

(1) 针对履带式甘蔗收获机中间有输送通道导

如图 14a、14b 所示,左前、左后调整油缸缸杆同步缓慢伸出,位移均从 0 伸长到 43.36 mm。1 s 结束时,车架与底盘之间夹角达到 10°左右,在目标角度 0.5°范围内波动。保持 10°夹角状态 4 s 后,从第 5 秒开始,左后调整油缸缸杆同步缓慢缩回,重新回到初始位置,机构回到初始状态。

左前调整油缸初始推力为 288.51 N,姿态横向调整过程中推力先增大后减小,最大值为 349.46 N,车架与底盘之间夹角达到 10°时,推力在 299.85 ~ 322.22 N 之间波动。在回到初始位置过程中,左前调整油缸推力先增大后减小,最大值为 370.80 N,回到初始位置时为 296.10 N。左后调整油缸初始

致利用空间小的限制,提出了一种两侧设置调平机构的方案,开展了底盘调平机构关键部件的参数设计和各调整油缸受力分析。

(2) 理论计算和试验结果表明,横向调整后横向倾翻角都比调整前的横向倾翻角大,横向倾翻角得到提高,调平底盘可以有效改变整机质心,在一定程度上提升了整机横向稳定性。在横向倾翻试验中,调整前横向倾翻角为 24.31°,横向调整后横向倾翻角为 27.52°,横向调整后横向倾翻角提高 13.20%。

(3) 横向姿态调整试验结果表明,横向调整角最大 10°,调整时间为 1 s,调整精度在 0.5°以内,基本满足设计要求,验证了机构横向姿态调整的可行性。在底盘调平机构初始状态,调整油缸所受负载最大,最大值为 871.61 N,换算成样机所需推力为 55 783.04 N。

参 考 文 献

[1] 吴传云,冯健,黄严,等. 我国甘蔗机械化现状分析与建议[J]. 甘蔗糖业,2021,50(3):11-15.

- WU Chuanyun, FENG Jian, HUANG Yan, et al. Analysis on the situation and proposal of sugarcane mechanization[J]. Sugarcane and Canesugar, 2021, 50(3): 11–15. (in Chinese)
- [2] OU Yinggang, MALCOLM W, YANG Dantong, et al. Mechanization technology: the key to sugarcane production in China[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(1): 1–27.
- [3] BAI J, MA S, HUANG X, et al. A comparison study on mechanized sugarcane production modes in China[C]//2019 ASABE Annual International Meeting, 2019.
- [4] 姜惠, 唐小虎, 张旭烽, 等. 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机运动控制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 392–403.
JIANG Hui, TANG Xiaohu, ZHANG Xufeng, et al. Motion control of attitude adjustment wheeled tractor in hilly and mountain areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 392–403. (in Chinese)
- [5] 牟孝栋, 杨福增, 段罗佳, 等. 丘陵山地拖拉机调平与防翻关键技术研究现状与发展趋势[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(3): 1–16.
MU Xiaodong, YANG Fuzeng, DUAN LuoJia, et al. Research advances and development trend of mountainous tractor leveling and anti-rollover system[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 1–16. (in Chinese)
- [6] 种昆, 李洪迁, 李政平, 等. 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机的设计与仿真[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 247–251.
CHONG Kun, LI Hongqian, LI Zhengping, et al. Design and simulation of wheel tractor with full attitude adjustment in hilly and mountain areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1): 247–251. (in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 徐凤鸣. 山地甘蔗高产优质栽培技术[J]. 中国热带农业, 2015(3): 97–99.
- [9] 罗晟昇, 廖韦卫, 韦海球, 等. 干旱胁迫对甘蔗生长研究进展[J]. 中国热带农业, 2020(5): 70–73.
LUO Shengsheng, LIAO Weiwei, WEI Haiqiu, et al. Research progress of drought stress on sugarcane growth[J]. China Tropical Agriculture, 2020(5): 70–73. (in Chinese)
- [10] HU Jinpeng, PAN Jiahui, DAI Buwang, et al. Development of an attitude adjustment crawler chassis for combine harvester and experiment of adaptive leveling system[J]. Agronomy, 2022, 12(3): 717.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] BALLESTEROS T, ARANA I, EZCURDIA P A, et al. E2D – ROPS: development and tests of an automatically deployable, in height and width, front-mounted ROPS for narrow-track tractors[J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(1): 1–14.
- [13] PIJUAN J, COMELLAS M, NOGUES M, et al. Active bogies and chassis levelling for a vehicle operating in rough terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2012, 49(3–4): 161–171.
- [14] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平山地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 358–369.
SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358–369. (in Chinese)
- [15] SUN Jingbin, MENG Chong, ZHANG Yazhou, et al. Design and physical model experiment of an attitude adjustment device for a crawler tractor in hilly and mountainous regions[J]. Information Processing in Agriculture, 2020, 7(3): 466–478.
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] 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 test of a leveling controlled chassis for track combine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(7): 1–8. (in Chinese)
- [18] 张开兴, 张澜, 李政平, 等. 轮式丘陵山地拖拉机扭腰姿态调整装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 425–433.
ZHANG Kaixing, ZHANG Lan, LI Zhengping, et al. Design and test of twisting and swinging attitude adjustment device of wheel hilly tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 425–433. (in Chinese)
- [19] 刘平义, 王春燕, 李海涛, 等. 丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 74–81.
LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 74–81. (in Chinese)
- [20] 刘平义, 彭凤娟, 李海涛, 等. 丘陵山区农用自适应调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 42–47.
LIU Pingyi, PENG Fengjuan, LI Haitao, et al. Design and experiment of adaptive leveling chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 42–47. (in Chinese)
- [21] 刘平义, 柯呈鹏, 柯婷, 等. 丘陵山区农用预检测主动调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 371–378.
LIU Pingyi, KE Chengpeng, KE Ting, et al. Design and experiment of pre-detection active leveling agricultural chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 371–378. (in Chinese)

[22] 蒋俞,孙泽宇,汪若尘,等. 丘陵山区履带式作业机全向调平系统设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2023,39(18): 64-73.
JIANG Yu, SUN Zeyu, WANG Ruochen, et al. Design and performance test of the omnidirectional leveling system for crawler work machine in hilly areas[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(18): 64-73. (in Chinese)

[23] 韩振浩,朱立成,苑严伟,等. 基于重心自适应调控的山地果园运输车设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):430-442.
HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Design and test of transport vehicle for hillside orchards based on center of gravity regulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):430-442. (in Chinese)

[24] 韩振浩,朱立成,苑严伟,等. 山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计[J]. 农业机械学报,2022,53(5):413-421,448.
HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Analysis of slope trafficability and optimized design of crawler chassis in hillside orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):413-421,448. (in Chinese)

[25] 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. (in Chinese)

[26] 齐文超,李彦明,陶建峰,等. 丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J]. 农业机械学报,2019,50(7):381-388.
QI Wenchao, LI Yanming, TAO Jianfeng, et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):381-388. (in Chinese)

[27] 彭贺,马文星,王忠山,等. 丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,49(1): 157-165.
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2019,49(1):157-165. (in Chinese)

[28] 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. (in Chinese)

[29] 汪若尘,苏兆睿,丁仁凯,等. 基于滑模同步控制的履带式作业机全向调平系统研究[J]. 农业机械学报,2024,55(4): 394-401.
WANG Ruochen, SU Zhaorui, DING Renkai, et al. Omnidirectional leveling system of crawler machine based on sliding mode synchronous position control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(4):394-401. (in Chinese)

(上接第 99 页)

[20] ZHOU Baocheng, MA Shaochun, LI Wenzhi, et al. Study on sugarcane chopping and damage mechanism during harvesting of sugarcane chopper harvester[J]. Biosystems Engineering, 2024, 243: 1-12.

[21] ZHOU Baocheng, MA Shaochun, LI Weiqing, et al. Study on the influence mechanism of energy consumption of sugarcane harvester extractor by fluid simulation and experiment[J]. Agriculture, 2023, 13(9): 1726.

[22] 刘鹏,何进,章志强,等. 基于 CFD-DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1):244-253.
LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang, et al. Kinematic characteristic analysis and field test of chopped stalk in straw retention machine based on CFD-DEM coupling simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1):244-253. (in Chinese)

[23] 刘超群. Liutex——涡定义和第三代涡识别方法[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(3):413-431, 478.
LIU Chaoqun. Liutex—third-generation of vortex definition and identification methods[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38(3):413-431, 478. (in Chinese)

[24] 王博,吴艳辉. 扩压叶栅叶尖非定常流动的涡动力学机理[J]. 航空学报, 2020, 41(11):246-262.
WANG Bo, WU Yanhui. Vortex dynamics mechanism of unsteady flow at the tip of the diffused blade grid[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(11):246-262. (in Chinese)

[25] 党政,席光,王尚锦. 叶片安装角对动/静叶排内部非定常流动的影响[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 319-322.
DANG Zheng, XI Guang, WANG Shangjin. Influence of blade mounting angle on the non-stationary flow inside a moving/static blade row[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(3): 319-322. (in Chinese)

[26] 刘家成,陈二云,杨爱玲,等. 非光滑表面叶片气动及降噪特性的研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(12): 31-39.
LIU Jiacheng, CHEN Eryun, YANG Ailing, et al. Study on noise reduction characteristics of blade with non-smooth surface [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(12): 31-39. (in Chinese)