

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.012

丘陵山区小型农机底盘自动调平系统设计及试验

贾新乐¹ 石舟² 李锐³ 张国海¹ 耿端阳¹ 兰玉彬¹ 王伯龙¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255000;

3. 长春瑞光科技有限公司, 长春 130025)

摘要: 为解决农机在丘陵山地坡度大、地块小等复杂地形下作业的稳定性差、效率低与驾驶安全舒适性差等问题, 本文提出了一种丘陵山区小型农机底盘的自动调平系统设计方案, 该系统整合了行驶系统、控制系统和调平执行机构。设计了自平衡的三点调平系统, 前方调平机构采用被动减震技术处理高频扰动, 后方则利用双导柱式伺服电缸确保运动轨迹的精确与稳定; 开发了以单片机为核心的控制系统, 结合以伺服电缸为主的电控技术, 实现作业底盘倾斜角度的自动调节, 提高农机在丘陵山区多样性地形下的稳定性和作业效率。为满足农机在复杂地形中对承载与稳定性的要求, 调平策略采用了设定点不动调平法并对其运动过程进行了分析。最后经过静态试验验证, 该系统可以使不同初始俯仰角和横滚角倾斜状态调整为 $-0.2^{\circ} \sim 0.2^{\circ}$ 的设定状态, 动态试验验证了实际工作时可以在2 s内将底盘倾角调整为 $-1.2^{\circ} \sim 1.2^{\circ}$ 且标准偏差约为 0.8° , 达到设计预期目标。

关键词: 丘陵山区; 农业机械; 底盘; 自动调平; 三点调平

中图分类号: S220.3; TP272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)S1-0108-08

Design and Test of Automatic Leveling System for Chassis of Small Agricultural Machinery in Hilly and Mountainous Areas

JIA Xinle¹ SHI Zhou² LI Rui³ ZHANG Guohai¹ GENG Duanyang¹ LAN Yubin¹ WANG Bolong¹

(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

3. Changchun Ruiguang Science and Technology Co., Ltd., Changchun 130025, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor stability, low efficiency and poor driving safety and comfort of agricultural machinery operating in complex terrain such as large slope and small plot, a design scheme of automatic leveling system for the chassis of small agricultural machinery in hilly and mountainous areas was put forward, which integrated the driving system, control system and leveling actuator. A self-balancing three-point leveling system was designed. The front leveling mechanism used passive damping technology to deal with high-frequency disturbance, and the rear used double guide post servo cylinder to ensure the accuracy and stability of motion trajectory. The control system based on single chip microcomputer was developed, and the electronic control technology based on servo cylinder was used to realize the automatic adjustment of the tilting angle of the working chassis, so as to improve the stability and working efficiency of the agricultural machinery in the hilly and mountainous terrain. In order to meet the requirements of load bearing and stability of agricultural machinery in complex terrain, the leveling strategy of "fixed set point leveling method" was adopted and its movement process was analyzed. Finally, the static test verified that the system can adjust the tilt state of different initial pitch angle and roll angle to the set state of $-0.2^{\circ} \sim 0.2^{\circ}$. The dynamic test verified that the chassis tilt angle can be adjusted to $-1.2^{\circ} \sim 1.2^{\circ}$ and the standard deviation was about 0.8° in actual work, reaching the design expectation.

Key words: hills and mountains; agricultural machinery; chassis; automatic leveling; three-point leveling

收稿日期: 2024-07-29 修回日期: 2024-09-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000502)、山东省重点研发计划项目(2023TSGC0536)、宁夏回族自治区重点研发计划项目(2023BCF01052)和日照市重点研发计划项目(2023ZDYF010114)

作者简介: 贾新乐(2001—), 男, 硕士生, 主要从事丘陵山地谷物收获技术与装备研究, E-mail: 15630816843@163.com

通信作者: 王伯龙(1989—), 男, 讲师, 主要从事谷物低损收获技术与装备研究, E-mail: wang1988-1226@163.com

0 引言

我国丘陵山区耕地面积占全国总耕地面积的 34.62%,播种面积占全国播种面积的 34.20%,因地形复杂、坡度大、耕地细碎分散且分布不均,交通不便且容易发生侧翻,丘陵山区整体机械化率不足 50%^[1-2]。为提高农机在丘陵山区作业的稳定性与便捷性,同时保证特殊地形农机具作业质量,可创新发展小型农机自动调平底盘技术。该技术通过自动调节底盘的倾斜角度,使农机在坡地或崎岖不平的地面上可以保持稳定,从而确保农机作业的连续性和准确性^[3-6]。

国内外的自动调平机械研究已取得显著进展。法国 DENIS 团队^[7]研发了在线自适应观测器,结合四轮液压调平技术,提升了越野收获机的安全性,但由于体积大导致在丘陵作业受到限制。意大利 MACH4R 山地拖拉机^[8],四轮驱动且可轮履互换,动力强,但是由于体型大、价格高、大坡度作业安全性差,难以适应中国丘陵山地复杂环境。国内也有较多针对丘陵山地调平系统的研究,柯超等^[9]针对丘陵山地移栽机工作易倾斜的问题设计了一种自动调平系统,其调平效果较好;邹大庆等^[10]设计的“三层车架”系统,提升山区作业效率,但增高设计影响机械重心,导致工作环境受到限制;刘平义等^[11]的设计虽实现自动平衡,但悬架缺少减震结构影响负载。综上,丘陵山地农业机械自动调平系统的设计与优化已经取得了显著成效,但实际应用仍存在一定局限。

本文提出一种针对丘陵山区中小型作业机械的自动调平系统,对三点调平机构进行设计并结合实际应用进行针对性改进,分析调平机构的运动学算法和工作原理,最后通过静态与动态测试试验,验证该系统在自动调平方面应用的可行性。

1 自动调平系统结构与关键执行机构

1.1 自动调平系统结构

自动调平系统以自主设计的丘陵山区农业机械底盘自动调平控制试验机为平台进行调试测验。由于设计对象的工作环境具有多样性,因此设计的底盘需要满足如下条件:结构相对紧凑、整体对称、质量分布均匀且具有良好的承载能力等。综合各种因素后设计的整机

由行驶系统、控制系统、调节机构、人机交互显示屏和供电系统组成,样机整体结构如图 1 所示,相关参数见表 1。



图 1 丘陵山区农业机械底盘自动调平控制试验样机

Fig. 1 Interior diagram of automatic leveling control testing machine

1. 平行式伺服电缸 2. 操纵杆 3. 电源 4. 减震弹簧 5. 前桥 6. 前轮 7. 后桥 8. 后轮 9. 驱动器安装柜 10. 控制元件安装柜 11. 直线式伺服电缸 12. 可触控显示屏

表 1 样机参数	
Tab. 1 Prototype parameters	
参数	数值
整机尺寸/(mm×mm×mm)	1 500×1 100×1 000
负载/kg	1 000
最大行驶速度/(km·h ⁻¹)	7.2
电缸运行最大速度/(mm·s ⁻¹)	80
电缸运行加速度/(mm·s ⁻²)	800

1.2 关键执行机构确定

由于液压系统可以提供更大的推力,并且可以相对容易地通过调节液压油的流量和压力来控制推力,目前自动调平系统在设计时使用液压系统较多。但丘陵山区环境复杂,液压系统的应用会受到限制,使用电缸作为调平的关键执行机构具有以下优势:体积小,机械结构简单,适用于中小型作业机械;响应速度快,具有精确的位置控制模式,从而可以保持稳定的调平状态;环境适应性较强,后期维护方便且成本低^[12-16]。综上所述,选用伺服电缸作为丘陵山地小型作业机械底盘自动调平系统的关键执行机构。自动调平系统工作原理图如图 2 所示。

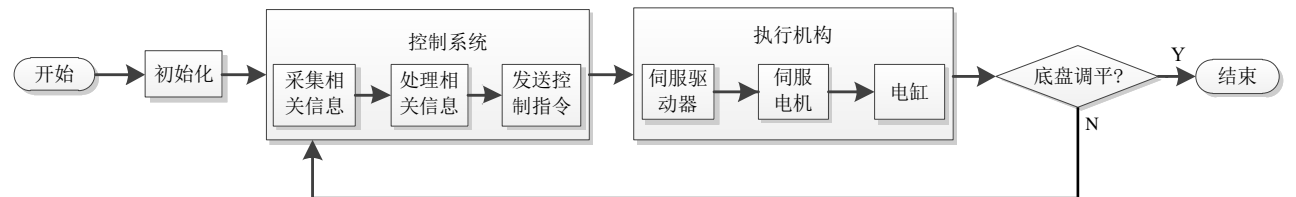


图 2 底盘自动调平系统工作原理图

Fig. 2 Schematic of chassis automatic leveling system

2 自动调平机械结构设计与分析

2.1 前方调平机构的设计

农业机械在丘陵山区环境中作业时受到的扰动频率范围较大,包括 10~40 Hz 的低频扰动,以及 140~200 Hz 的高频扰动。为增强系统抗干扰性,提高工作效率,应在保证控制低频扰动的同时,增强对高频扰动的控制。因此,针对前方调平系统设计了如图 3a 所示的调平支架结构,上方伺服电缸型号为米思米 E-ECTL75-05-S200-RC-M750W,伺服电机型号为大研工控 ACL801000 T5-2500M-48-19,伺服驱动器型号为 IDS850PRO,下方为 J6 型减震器;图 3b 为前方调平整体结构图。在工作时,控制系统检测车身角度,向伺服电机驱动器发送控制指令,使用主动控制与被动减震相结合的技术使电缸按设定指令伸缩,以达到有效应对车载及复杂环境的目的;同时,前轮与前桥之间采用平行四杆连接方式,可以保证车辆在左右倾斜路面行驶时,前轮始终保持竖直状态,减少车身的侧倾与摇晃,增强车辆的操稳性和行驶平稳性。

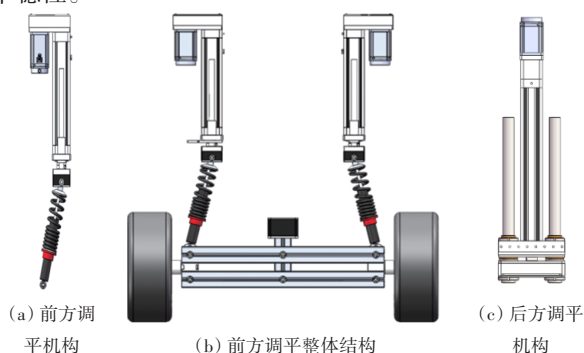


图3 调平机构

Fig. 3 Leveling mechanism

2.2 后方调平机构的设计

农业机械在复杂多变的环境中运动会导致电缸缸体产生振动与摇晃,进而引发运动轨迹出现偏差及工作性能波动的问题。为解决这一问题,后方调节机构设计为如图 3c 所示的双导柱式,减小了伺服电缸在不稳定工况下的侧向偏移量,确保了运动轨迹的精确与稳定。导柱作为物理支撑,在动态调节时可以有效增强电动缸的整体刚度,保证其响应速度与控制精度,为机械作业提供可靠、稳定的自动调平能力。

2.3 电缸位置分布策略

为扩大底盘使用空间并满足农机具对稳定性的需求,对调平支架位置设计了如图 4 所示的分布图。如图 4a 所示,为提高空间利用率和车辆稳定性,在车辆的前部安装 2 个平行于车轴的调平支架;为平衡前后负载,

车辆的后部安装第 3 个调平支架;3 个调平机构距离关系如图 4b 所示。

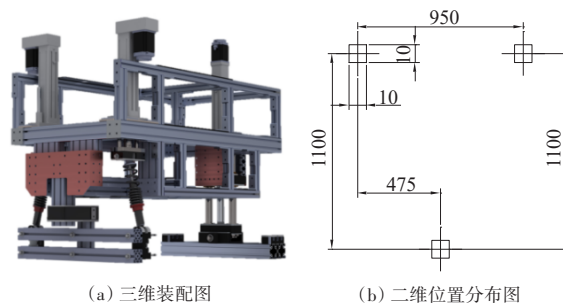


图4 3个电缸的位置分布

Fig. 4 Position distribution of three leveling brackets

2.4 调平平台运动学分析

调平系统设计目的是在系统检测到底盘倾斜时,可以自动调整倾斜平面为一个水平面,因此需要根据已知倾斜平台的位置与姿态,计算出各移动副的位移,使平台到达设定状态。设计图 5a 所示的运动学分析模型,上方圆表示实际移动平台,以其中心为原点,所在平台平面内建立 $PUVW$ 坐标系。下方圆表示目标平台,以目标平台中心为原点,在目标平台的平面建立 $OXYZ$ 坐标系; A_1, A_2, A_3 分别表示 3 个支架的球面副所在点, B_1, B_2, B_3 分别表示 3 个支架的转动副所在点, L_1, L_2, L_3 分别表示 3 个支架的移动副。图 5b 为实物调平简化模型,上平面表示实际平面,下平面为目标水平面, l_1, l_2, l_3 表示 3 个移动副的长度, s 表示前方 2 个电缸之间的距离, t 表示后方电缸到前方电缸连线的距离, s 和 t 均为已知长度。

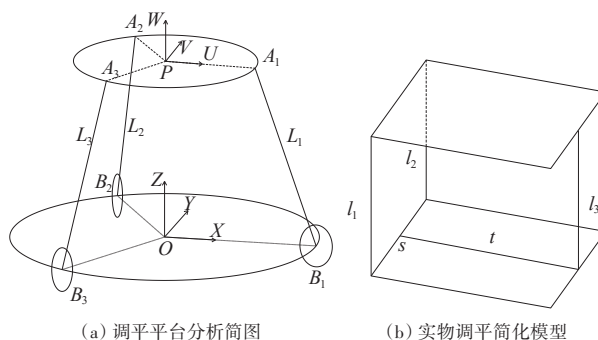


图5 调平机构运动学分析简图

Fig. 5 Schematics of kinematic analysis of leveling mechanism

对于常见的 Z - Y - X 型欧拉角,设其载体坐标系为 $OX'Y'Z'$,设绕 Z 轴的偏航角为 ψ ,绕 Y' 轴的俯仰角为 θ ,绕 X' 轴的横滚角为 φ 。

由现有研究并结合文献[17]可知,用于计算从载体坐标系 $OX'Y'Z'$ 转变到固定坐标系 $OXYZ$ 的方向余弦为

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \cos\varphi\sin\psi & \sin\psi\sin\theta + \cos\varphi\cos\theta\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\theta\sin\varphi & \cos\varphi\sin\psi\sin\theta - \cos\psi\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

本设计中,自动调平底盘不需要考虑偏航角,故有

$$\begin{cases} \psi = 0^\circ \\ \sin \psi = 0 \\ \cos \psi = 1 \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得简化方向余弦

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\sin\varphi & \cos\varphi\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

目前对移动平台的正反解研究^[17-22]已经取得很大进展,结合文献[17-22]和已知数据可以解得移动副长度 l_1, l_2, l_3 ,在控制系统程序算法设计中得以合理应用。

设坐标系 $PUVW$ 的原点 P 在坐标系 $OXYZ$ 中的位置矢量 p 为

$$p = [P_x, P_y, P_z]^T \quad (4)$$

设 a 为点 A_i 与原点 P 距离,则点 A_i 在坐标系 $PUVW$ 的坐标为

$$A_i = [a_{i1}, a_{i2}, 0]^T \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

结合式(3)~(5)解得 A_i 在坐标系 $OXYZ$ 的坐标 A'_i 为

$$A'_i = RB_i + p \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

设 b 为点 B_i 与原点 O 距离,点 B_i 在坐标系 $OXYZ$ 的坐标为

$$B_i = [b_{i1}, b_{i2}, 0]^T \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

结合式(6)、(7)可以解得移动副长度

$$l_i^2 = (A'_i - B_i)(A'_i - B_i)^T \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

3 控制策略及调平过程

3.1 控制策略

设定点不动调平法是选择一个固定点作为基准点,保持其高度不变,通过调整3个支撑腿的高度使倾斜平台达到水平状态的一种调平方法。设定点不动调平法相比较于逐高调平法和逐低调平法而言,控制系统无需通过复杂的逻辑判断最高或最低支撑腿的位置,可以更简便地计算和调整支撑腿的位置,并且具有更短的调平距离。这种调平方法可以减少调整次数,缩短调平时间,提高调平效率,因此选用此方法作为设计中的控制策略。本设计中,将设定点定为前方电缸运动距离的中心点,可以缩短调平时间、减小机械重心变化,有效应对负载变化和多样性导致的倾斜问题,确保农机具在复杂地形上作业时的平稳性和安全性^[23-27]。

3.2 调平机构工作过程分析

农机具通过前方2个伺服电缸实现左右调平,调平过程示意图如图6所示。

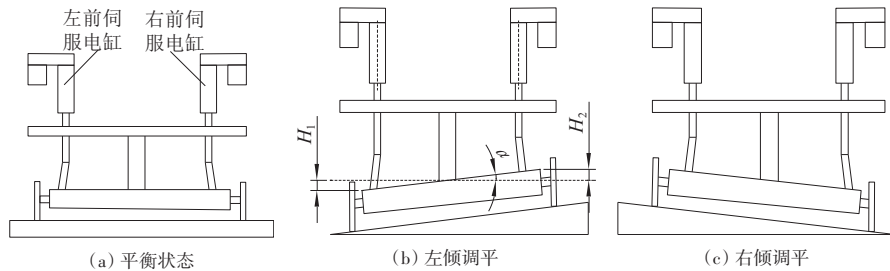


图6 左右调平过程示意图

Fig. 6 Schematics of left and right leveling process

以左倾情况为例分析设定点不动调平法工作过程及原理, H_1 为前桥上平面的左侧端点与中心点垂直距离, H_2 为前桥上平面的右侧端点与中心点垂直距离。当车辆行驶在倾斜角为 α 的左倾地面时,调平前车身姿态为左低右高,调平时左前轮需要提高 H_1 ,右前轮以相同速率降低 H_2 ,即图6b中

$$H_1 = H_2 \quad (9)$$

调平后车桥与地面水平,车身处于水平状态。

结合调平策略,可将如图7a所示的左前方三维模型简化成如图7b所示的数学模型。前方横梁左侧长度为 L_{AB} ,前方纵梁长度为 L_{BC} ,前桥左侧长度为 L_{CF} ,减震器长度为 L_{FG} , G_1 为水平条件下点 G 位置, G_2 为倾斜情况下点 G 位置,水平状态与左倾状态下电缸伸出长度分别为 L_{AG1}, L_{AG2} 。由于调平过程中只有电缸的长度变化,因此图7c中只有点 G_2 和 F 运动,点 G_2 运动为竖直方向上的直线运动,点 G_2 到 BD 的水平距离是固定的,点 F 运动为绕

点 C 的旋转运动,点 F 到 BD 的水平距离为 L_{DF} ,点 F 到 AB 的垂直距离为 L_{BD} ,点 F 与点 G_2 之间的垂直距离为 L_{EG2} ,点 F 与点 C 之间的垂直距离为 L_{CD} ,因此电缸运动时伸缩的长度 L_{G1G2} 不是车轮上升或下降的距离。结合图7简图分析可知,当左倾角为 α 时,左前轮需要上升的距离为 L_{CD} ,则有

$$H_1 = L_{CD} \quad (10)$$

由已知条件可得

$$L_{CD} = L_{CF} \sin \alpha \quad (11)$$

$$L_{G1G2} = L_{AG2} - L_{AG1} \quad (12)$$

$$L_{AG2} = L_{BD} - L_{EG2} \quad (13)$$

$$L_{EG2} = \sqrt{L_{FG}^2 - (L_{CF} \cos \alpha - L_{AB})^2} \quad (14)$$

$$L_{BD} = L_{BC} + L_{CD} \quad (15)$$

则电缸伸缩长度 L_{G1G2} 与倾斜角 α 之间的关系为

$$L_{G1G2} = L_{BC} + L_{CF} \sin \alpha - \sqrt{L_{FG}^2 - (L_{CF} \cos \alpha - L_{AB})^2} - L_{AG1} \quad (16)$$

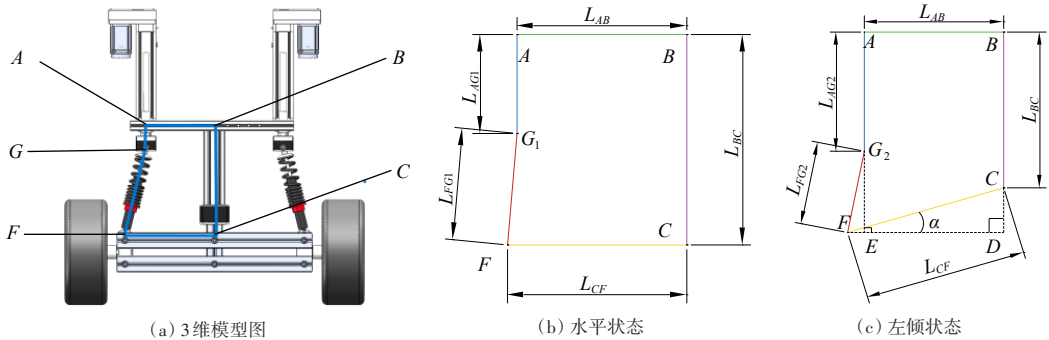


图7 左前方调平过程简图

Fig. 7 Diagrams of leveling process in front left

车辆通过后方伺服电缸实现前后调平,图8为前后调平过程示意图,调平过程与左右调平相似,当上坡或下坡行驶时,通过调节后方电缸的伸缩来实现倾斜底盘的调平。由2.4节可知,前后轮中心的水平距离为 t ,由于是通过竖直方向上的直线运动实现调平,电缸伸缩长度即为实际需要调平的距离,有

$$H_3 = t \tan \beta \tag{17}$$

式中 H_3 ——前后轮中心高度差
 β ——初始前后倾斜角

由于设计方案中底盘是通过前方电缸实现左右调平,通过后方电缸实现前后调平,所以此设计方案可以实现前后左右同时进行调平。

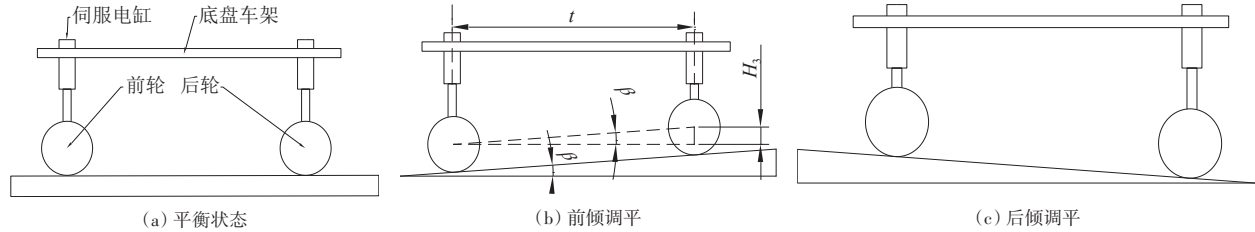


图8 前后调平过程示意图

Fig. 8 Schematic of front and rear leveling process

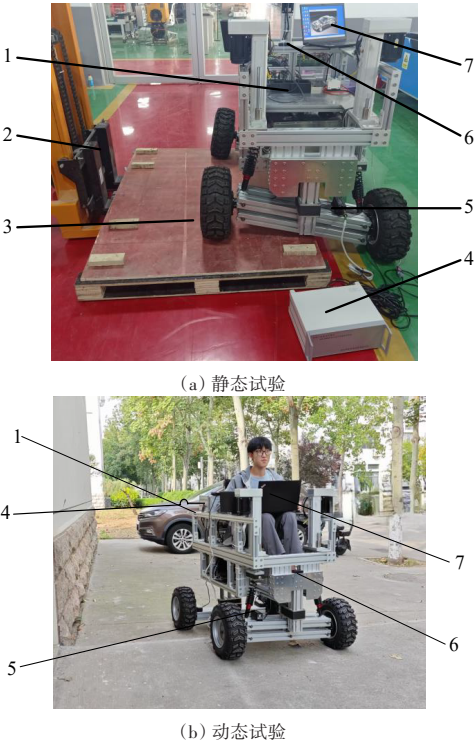
4 试验分析

4.1 试验设计

试验设备如图9所示,使用一套AM-2800型机动车综合性能测试系统对试验过程数据进行记录和分析,在车身平面安装一个倾角传感器来监测并记录车身角度变化情况,在车前桥或后桥位置安装另一个倾角传感器来检测并记录其角度,将2个传感器数据进行对比,便于分析初始状态倾角和最终调平效果。静态试验时,使用叉车和托盘人为改变试验样机角度模拟不同倾斜情况,通过计算机监测并记录调平模式开启前后的实时角度变化情况,试验设备如图9a所示;动态试验时使车辆行驶在角度随机变化的路面,对比2个传感器角度观察调平效果,试验设备如图9b所示。

4.2 静态试验

在进行静态调平试验前,通过分别测量前后轮和左右轮之间的距离,计算出倾斜不同角度时叉车需要抬升的高度。试验初始横滚角以及俯仰角分别设为 -9° 、 -6° 、 -3° 、 3° 、 6° 、 9° ,每组角度重复试验3次。为形成对比,测量横滚角的同时测量车辆前桥的角度,测量俯仰角的同时测量前后桥之间的角度。将所有角度数据分成 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 6^\circ$ 、 $\pm 9^\circ$ 3组,每组数据绘制成角度-时间曲线图,结果如图10所示。



(b) 动态试验

图9 试验设备

Fig. 9 Test equipment

1. 试验样机 2. 叉车 3. 托盘 4. 姿态测试系统 5. 前桥处倾角传感器 6. 车身处倾角传感器 7. 计算机

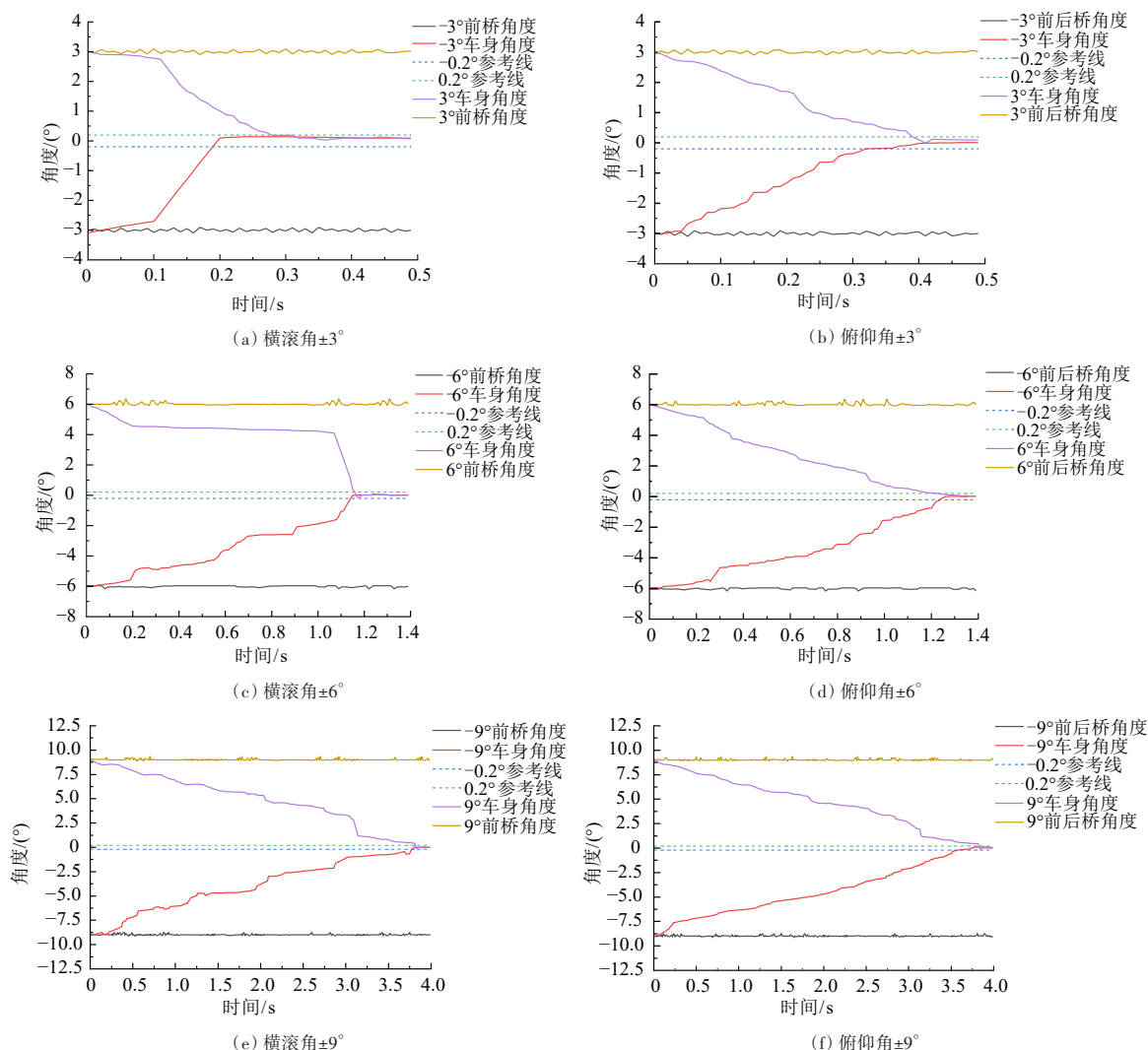


图 10 静态调平试验结果

Fig. 10 Static leveling test results

从数据整体来看,当试验初始横滚角或俯仰角设定为 -9° 、 -6° 、 -3° 、 3° 、 6° 、 9° 时,自动调平系统均能在较短时间内有效地将底盘调整至 $-0.2^\circ \sim 0.2^\circ$,符合预期目标,为后续实地测试和应用提供了数据支持。

纵向分析试验结果可以发现,倾斜 3° 时调平时间约为 0.4 s ,倾斜 6° 时调平时间约为 1.2 s ,倾斜 9° 时调平时间约为 4 s ,在同一种倾斜情况下,随角度增大调平时间逐渐增大,调平结果仍在设定范围内。横向对比横滚角与俯仰角同一倾斜角度可以发现,横滚角调平曲线有斜率较大的情况,俯仰角调平曲线相对较为平缓,这是由于前方有减震结构,减震结构处弹簧受力会使左右电缸的伸缩过程受到一定影响,但不会影响调平结果,同时也证明了减震方案的可行性。

4.3 动态试验

经过静态试验已经验证了该调平系统可以正常工作,需要进行动态试验,验证实际工作时的调平效果,设计方案为开启驾驶模式后,连续改变车身角度,模拟山地作业行进时不同倾角连续变化的情况。考虑到实际工作时小角度的微调会导致调平较慢,在遇到坡度变化

较快的地面行驶时,系统轻微延迟与频繁微调可能会引起抖动,在角度连续变化时,把调平结果预期范围设置为 $-1.2^\circ \sim 1.2^\circ$ 。将调平过程中采集到的横滚角与俯仰角数据整理并绘制成曲线图,试验结果如图 11 所示。

控制系统中姿态传感器采集的数据为车身倾斜情况,在车辆连续行驶时,由于调平机构的工作,采集的角度是相对前一次调平结果的角度。当车身角度为 $-1.2^\circ \sim 1.2^\circ$ 时,调平机构处于停止状态,车身角度曲线与车前角度曲线走势相同,当车身角度超出设定范围后,控制系统可以及时发送控制指令,调平机构开始工作,曲线会发生相对变化。结合静态调平结果可知,调平过程需要一定时间;结合图 11 可以看出,当车身倾斜时可以在 2 s 内调整到预期角度;调平后车身角度中有 83% 的数据控制在设定范围内,对范围内的角度数据进行分析,结果如表 2 所示。

由表 2 中数据可以发现:横滚角与俯仰角调平平均值分别为 0.28° 、 -0.20° ,均在调平范围内且数值较小;标准偏差分别为 0.77° 、 0.86° ,数值较小符合预期设计目标;绝对值最小值为 0.01° 与 0.07° ,与水平角度接近,证明设计方案可行,后续机械结构与控制系统程序优化后可以达到更优效果。

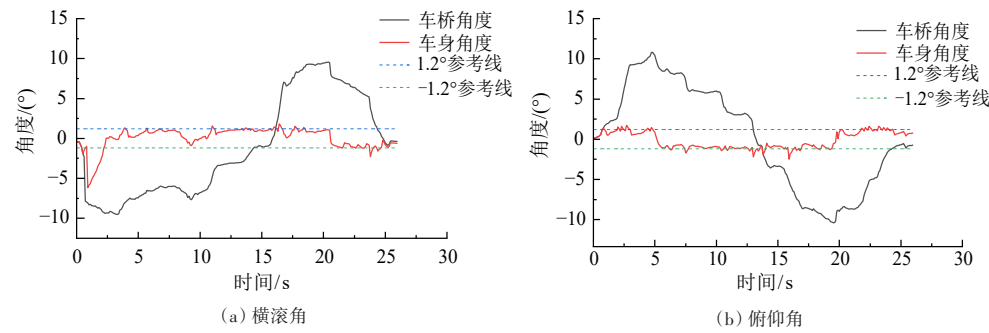


图 11 动态调平试验结果

Fig. 11 Dynamic leveling test results

表 2 横滚角与俯仰角调平结果分析

Tab. 2 Analysis of roll and pitch angle leveling results

项目	横滚角/(°)	俯仰角/(°)
平均值	0.28	-0.20
标准偏差	0.77	0.86
绝对值最小值	0.01	0.07
绝对值最大值	1.20	1.20

5 结 论

(1)提出了一种针对丘陵山地农机具底盘自动调平

系统的设计方案,设计了三调平机构,并结合丘陵山区应用环境进行了针对性优化。

(2)采用了设定点不动调平法的控制策略,并以左倾情况为例对调平机构工作过程进行分析,从理论上分析了机构运动的可行性,为动态调平提供了理论基础。

(3)静态试验验证了调平系统可以在较短时间内有效地将底盘调整至 $-0.2^{\circ}\sim 0.2^{\circ}$,证实了该调平系统理论的正确性;动态试验结果表明在角度连续变化时调平结果的角度有83%在 $-1.2^{\circ}\sim 1.2^{\circ}$,标准偏差分别为 0.77° 与 0.86° ,验证了连续工作时的实用可行性。

参 考 文 献

[1] 邵腾伟,王堃.从“以机适地”到“改地宜机”的丘陵山区农业机械化路径优化[J].中国农机化学报,2024,45(3):269-277.
SHAO Tengwei, WANG Kun. Path optimization of agricultural mechanization in hilly areas from “adapting to land conditions with machinery” to “farmland construction suitable for mechanization” [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(3): 269 - 277. (in Chinese)

[2] 刘鹏伟,杨敏丽,张小军,等.基于高质高效的西南丘陵山区机械化生产模式评价[J].农业机械学报,2022,53(增刊1):140-149.
LIU Pengwei, YANG Minli, ZHANG Xiaojun, et al. Evaluation of mechanized production model based on high quality and high efficiency in southwest hilly and mountainous areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Sup. 1): 140 - 149. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 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,2024,6(3):1-16.
MU Xiaodong, YANG Fuzeng, DUAN Luoia, et al. Research advances and development trend of mountainous tractor leveling and antirollover system [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 1 - 16. (in Chinese)

[5] 车刚,刘威,万霖,等.水稻秧棚苗床精平机自动调平系统设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(22):9-17.
CHE Gang, LIU Wei, WAN Lin, et al. Design and experiment of the automatic leveling system for the seedbed precision leveler in rice seedling nursery [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(22): 9 - 17. (in Chinese)

[6] WANG Q, MENG Z J, WEN C K, et al. Grain combine harvester header profiling control system development and testing [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 223: 109082.

[7] DENIS D, THUÏLOT B, LENAIN R. Online adaptive observer for rollover avoidance of reconfigurable agricultural vehicles [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 126: 32 - 43.

[8] 吴清分. BCS公司 Sky-Jump-V950 型半履带式拖拉机[J].拖拉机与农用运输车,2019,46(6):8-10.
WU Qingfen. Sky-Jump-V950 half-track tractor of BCS company [J]. Tractor & Farm Transporter, 2019, 46(6): 8 - 10. (in Chinese)

[9] 柯超,谢守勇,邓成志,等.丘陵山地移栽机自动调平系统设计与试验[J].中国农机化学报,2023,44(8):17-26.
KE Chao, XIE Shouyong, DENG Chengzhi, et al. Design and test of automatic leveling system for transplanter in hilly and mountainous areas [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(8): 17 - 26. (in Chinese)

[10] 邹大庆,丁仁凯,石放辉,等.丘陵山区履带式作业机全向调平系统设计[J].农业装备技术,2023,49(4):11-13.

[11] 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)
- [12] 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 sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 98 - 105, 115. (in Chinese)
- [13] 李尚平, 闫昱晓, 徐冰, 等. 丘陵地区剪叉式甘蔗转运车调平控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 384 - 393.
LI Shangping, YAN Yuxiao, XU Bing, et al. Design and experiment on leveling control system of scissor type sugarcane transporter in hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 384 - 393. (in Chinese)
- [14] 王晓燕, 邓博, 谭丁炀, 等. 无驱动式自动调平水田埋秆起浆整地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 20 - 31.
WANG Xiaoyan, DENG Bo, TAN Dingyang, et al. Design and experiment of undriven soil puddling machine with improved auto-leveling and straw-burying design for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 20 - 31. (in Chinese)
- [15] 周志艳, 周铭杰, 陈羽立, 等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 70 - 79.
ZHOU Zhiyan, ZHOU Mingjie, CHEN Yuli, et al. Automatic leveling control system of rotors hovering spray boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 70 - 79. (in Chinese)
- [16] JOO C L, JIN H K, WOO J H, et al. An ISOBUS-networked electronic self-leveling controller for the front-end loader of an Agricultural tractor[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(6): 757 - 767.
- [17] 赵静一, 张荣兵, 孙龙, 等. Stewart 平台位置反解研究[J]. 液压与气动, 2017(12): 40 - 47.
ZHAO Jingyi, ZHANG Rongbing, SUN Long, et al. Position inverse solution of Stewart platform[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(12): 40 - 47. (in Chinese)
- [18] 周文涛, 谢文洪, 李初晔, 等. 3PRS 并联机构的运动学和误差分析[J]. 制造技术与机床, 2024(9): 52 - 57.
ZHOU Wentao, XIE Wenhong, LI Chuye, et al. Kinematics and error analysis of 3PRS parallel mechanism[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(9): 52 - 57. (in Chinese)
- [19] 曾帅, 郭忠峰, 王赫莹. 基于四足并联脊柱 3-RPS 机构运动研究[J]. 机械工程师, 2024, (6): 83 - 86, 90.
ZENG Shuai, GUO Zhongfeng, WANG Heying. Kinematic study of 3-RPS mechanism based on a quadruped parallel spine[J]. Mechanical Engineer, 2024, (6): 83 - 86, 90. (in Chinese)
- [20] 高朝. 基于永磁同步直线电机协同的 3-RPS 并联平台位姿控制研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2022.
- [21] 严智敏, 徐顺建, 简辉华. 3-RPS 并联机器人动力学分析及模糊控制仿真[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 537 - 541, 567.
YAN Zhimin, XU Shunjian, JIAN Huihua. Dynamic analysis and fuzzy control simulation of 3-RPS parallel robot[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2019, 40(6): 537 - 541, 567. (in Chinese)
- [22] SONG Z C, JIANG S R, CHEN B, et al. Analysis of dynamic modeling and solution of 3-RPS parallel mechanism based on conformal geometric algebra[J]. Meccanica, 2022, 57(6): 1443 - 1455.
- [23] 于春生, 胡伟, 付明刚, 等. 小型玉米收获机车身调平系统研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(11): 104 - 109.
YU Chunsheng, HU Wei, FU Minggang, et al. Research on the body leveling system of small corn harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(11): 104 - 109. (in Chinese)
- [24] 谢敬心, 徐世许, 肖克. 智能化三点支撑液压调平控制系统设计[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(4): 32 - 35, 50.
XIE Jingxin, XU Shixu, XIAO Ke. Design of three-point support hydraulic leveling control system[J]. Automation & Instrumentation, 2022, 37(4): 32 - 35, 50. (in Chinese)
- [25] 孙乾坤, 张静, 杨艳明, 等. 丘陵山地拖拉机底盘三点调平机构稳定性分析[J]. 农业工程, 2023, 13(1): 91 - 97.
SUN Qiankun, ZHANG Jing, YANG Yanming, et al. Stability analysis of three-point leveling mechanism of hilly mountain tractor[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(1): 91 - 97. (in Chinese)
- [26] 吴海志, 朱少杰, 张帆, 等. 机电式支承平台自动调平控制系统设计[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 29 - 35.
WU Haizhi, ZHU Shaojie, ZHANG Fan, et al. Design of automatic leveling control system for electromechanical support platform[J]. Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2021, 35(4): 29 - 35. (in Chinese)
- [27] 庄肖波, 李耀明. 基于鲁棒反馈线性化的联合收获机割台高度控制策略[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 123 - 130.
ZHUANG Xiaobo, Li Yaoming. Header height control strategy of harvester based on robust feedback linearization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 123 - 130. (in Chinese)