doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.042

丘陵地区剪叉式甘蔗转运车调平控制系统设计与试验

李尚平[1,2]　闫昱晓[1]　徐　冰[2]　李凯华[1]　李　威[1]　彭　卓[2]

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

摘要:针对丘陵地区甘蔗转运车在田间作业操作难、转运过程易发生侧翻事故等问题,设计了一种剪叉式甘蔗转运车调平控制系统。通过搭建甘蔗转运车试验平台,基于状态测量单元、单片机嵌入式系统、液压系统,实现甘蔗在转运前车身姿态自动调平功能;保持车身状态处于安全范围内,对车厢进行提升、翻转等控制,完成甘蔗转运过程所需动作。为研究影响车身稳定的因素,在试验平台负载质量 120 kg 工况下,分别选取车身侧向角为 0°、2°、4°、6°、8°,支撑结构侧向跨距为 490、650、730 mm 的状态参数进行负载作业临界试验。并采用"追逐式"调平策略进行自动调平试验,验证系统平稳控制的可靠性。结果表明:车身侧向角和底盘支撑结构跨距对其稳定性具有显著影响,730 mm 为支撑结构最佳侧向跨距;支撑结构侧向跨距 490 mm 且车身初始侧向角 6°时为危险临界状态,甘蔗转运过程存在较大安全隐患。设计的调平控制系统在 20 s 内调平,精度可达到 0.3°;当车身通过调平安全检测后,可在 35 s 内平稳完成车厢提升转运等卸蔗动作,满足 60 s 内完成安全转运卸蔗的设计要求,提高了丘陵地区甘蔗转运车作业的安全性和工作效率。

关键词:丘陵地区;甘蔗转运车;自动控制;调平;平稳性;临界试验

中图分类号:U463.94;TH137.51　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)11-0384-10　　**OSID**:

Design and Experiment on Leveling Control System of Scissor Type Sugarcane Transporter in Hilly Area

LI Shangping[1,2]　YAN Yuxiao[1]　XU Bing[2]　LI Kaihua[1]　LI Wei[1]　PENG Zhuo[2]

(1. *College of Electronic Information*, *Guangxi University for Nationalities*, *Nanning* 530006, *China*
2. *College of Mechanical Engineering*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of difficult operation of sugarcane transporter in the hilly area and easy rollover accidents during the transfer process, a leveling control system for the scissor sugarcane transporter was designed. By building a sugarcane transporter test platform, the automatic leveling function of the body attitude was realized before sugarcane transfer based on the state measurement unit, single-chip embedded system, and hydraulic system. The function kept the body state within a safe range, and controlled the lifting and turning of the carriage to complete the actions required for the sugarcane transfer process. In order to study the factors affecting the stability of the car body, a critical operation test was carried out on the test platform with load of 120 kg. The state parameters were selected as the lateral angle of the vehicle body as 0°, 2°, 4°, 6° and 8°, and the lateral span of the supporting structure as 490 mm, 650 mm, and 730 mm, respectively. And the automatic leveling test was carried to verify the reliability of the stable control of the system using the "chasing" leveling strategy. The results showed that the lateral angle of the vehicle body and the span of the chassis support structure had a significant impact on its stability, and 730 mm was the best lateral span of the support structure; when the lateral span of the supporting structure was 490 mm and the initial lateral angle of the body was 6°, it was a critical state, and the sugarcane transportation process had safety risks. The designed system can level the transporter within 20 s, and the accuracy can reach 0.3°; when the car body passed the leveling safety test, the vehicle can complete unloading operations such as car lift and transfer within 35 s, satisfying the safety transfer and unloading within 60 s. The control system improved the safety and work efficiency of sugarcane transporter in hilly areas.

Key words: hilly area; sugarcane transporter; automatic control; leveling; stability; critical test

收稿日期:2020-12-09　修回日期:2021-01-10

基金项目:广西科技重大专项(桂科 AA17202043)

作者简介: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

甘蔗作为我国重要的经济作物，90% 的产地集中在广西、云南等多丘陵地区，丘陵蔗田约占种植面积的 60% 以上[1]。种植方式存在小而分散，地形复杂，机耕道路差等问题，影响了甘蔗全程机械化推进，造成原料及砍运成本居高不下，严重制约了我国糖业发展和在国际上的竞争力[2-3]。目前，我国丘陵地区的甘蔗转运车多采用半挂侧翻式结构或厢式转运结构[4-5]，依靠操作员手动操作进行甘蔗转运。车型轮距大、提升重心高，在田间进行甘蔗转运时，由于地形复杂或操作员经验不足，容易发生侧翻危险，造成较大的经济和安全损失。

国外甘蔗种植区主要集中在平原地区，因地貌环境和种植方式的差异，引进和仿制国外的甘蔗转运车轮距过宽、安全性差，不适用于我国蔗田的地形地貌[6]。因此，需开发适用于丘陵地区的甘蔗转运车，提高甘蔗机械化种植效率。本文基于课题组自主研发的剪叉式甘蔗转运车机构特点[7]，研究针对丘陵地区甘蔗转运车卸蔗前车身的自动平衡，实现对转运车安全提升作业的有效控制。

国内外学者对于农机具的调平研究，多为采用底盘上的三点悬挂支撑方式调整机身[8-12]与耕整地类农机的牵引器具调平[13-16]，鲜见对丘陵地区甘蔗转运车等载重农机的驻车调平控制系统研究[17-18]。丘陵地区甘蔗转运车存在安全性不足，工作环境恶劣等隐患，现有控制方法和调平策略没有解决甘蔗转运车采用四点支撑结构会出现“虚腿”（三点支撑结构用于支撑平台，一个位于最低点的支撑结构处于悬空或者不受力状态，以下简称为“虚腿”）问题，在地况复杂的环境中难以稳定作业，且甘蔗转运车在卸蔗时，手动操作难度高、效率低等问题有待解决。本文基于剪叉式甘蔗转运车，针对转运车在卸蔗过程的稳定性和工作效率问题，设计一种剪叉式甘蔗转运车调平控制系统，以期提高丘陵地区剪叉式甘蔗转运车的安全性和工作效率。

1　系统结构与工作原理

1.1　系统结构组成

剪叉式甘蔗转运车采用双剪叉式提升机构，系统结构如图 1 所示。转运车负责甘蔗收获机与大型集蔗车之间的转运工作，由于集蔗车的车厢护栏高，该双剪叉式甘蔗转运车在丘陵地区田间驻车卸蔗前，需将车厢提升至 3.8 m 高度再进行车厢翻转和侧面卸载作业。但因地面不平，导致转运车底盘和车身处于不平衡的状态，整车重心极易发生较大程度偏移甚至侧翻事故。因此，卸蔗前需要先调整车身平衡，再进行提升转运作业。

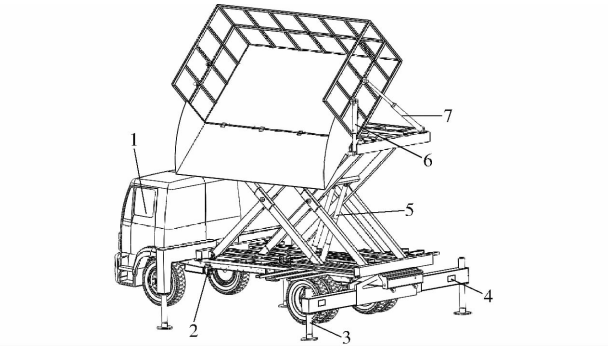

图 1　剪叉式甘蔗转运车系统结构图

Fig. 1　Scissor sugarcane transporter structure diagram

1. 控制中心　2. 三轴姿态传感器　3. 辅助支撑装置液压缸　4. 压力变送器　5. 车厢提升液压缸　6. 车厢门液压缸　7. 车厢翻转液压缸

1.2　工作原理

控制中心安装于驾驶室内，分别与三轴姿态传感器和压力变送器通信连接，用于实时接收转运车状态信号，并输出使各液压缸动作的控制信号；三轴姿态传感器固定于车身底盘，用于测量转运车与水平面的夹角 α（车身左右方向偏移角度，简称侧向角 α）和 β（车身前后方向偏移角度，简称纵向角 β）；4 个辅助支撑装置安装于底盘结构支点处；压力变送器安装于各个辅助支撑装置液压缸进油口，用于实时监测液压缸内的压力变化情况。甘蔗转运车调平控制系统工作原理如图 2 所示，控制中心接收来自各传感器的信号，发出指令通过液压系统控制各个液压缸有序调平动作；经过车身状态安全检测后，再进行卸蔗所需的车厢提升、车厢门开启、车厢向侧面倾倒、车厢收回下落和辅助支撑装置收回等动作。

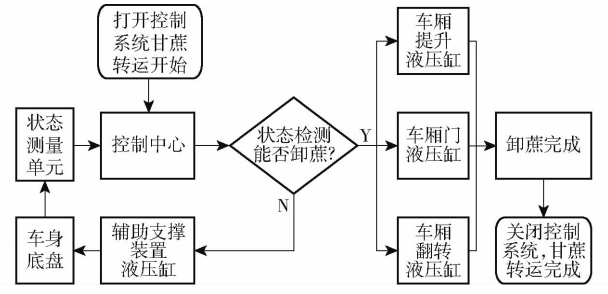

图 2　甘蔗转运车调平控制系统工作原理图

Fig. 2　Working principle diagram of leveling control system of sugarcane transporter

2　辅助支撑调平系统设计

2.1　辅助支撑机构

平台辅助支撑结构可分为三点支撑、四点支撑或多点支撑[19-20]。且支撑点数量越多，控制过程越冗杂，其中三点支撑实现较为简单，但三点支撑易出

现倾覆,不适于丘陵地区农机调平。相比较三点支撑,四点等多点支撑的稳定性较好但控制策略和系统设计难度较高,且易出现“虚腿”现象,不仅造成各支撑结构受力严重不均、对整个底盘支撑平台形成冲击,同时影响转运车在后续使用过程的稳定性。由于转运车自重和车厢装载吨位较大,本设计将辅助支撑装置液压缸设计为可活动的辅助支撑腿。在各个支撑装置液压缸进油口安装压力变送器,对缸内受压情况进行实时监测,采用闭环控制法有效解决四点支撑结构容易出现的“虚腿”问题。因此,本文采用适用丘陵地区驻车作业的四点支撑结构,设计调平策略对转运车调平进行控制。

2.1.1 “虚腿”检测

甘蔗转运车调平控制方案在进入调平流程前,首先需解决“虚腿”问题。控制中心实时检测各个辅助支撑装置液压缸内部压力情况 $p_i(i=1,2,3,4)$,通过 $p_i \leqslant p'$(p'为由转运车自重计算出的各辅助支撑装置承重值)判断该辅助支撑装置是否着地承重,且在车身调平后继续检测转运过程中是否存在“虚腿”现象,以保证转运过程稳定安全性。辅助支撑“虚腿”检测原理图如图 3 所示。

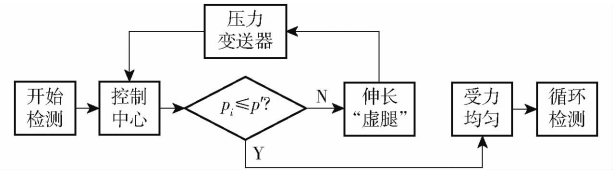

图 3 辅助支撑“虚腿”检测原理图

Fig. 3 “Virtual leg” detection principle diagram

2.1.2 调平控制策略设计

假设甘蔗转运车倾斜状态下车身底盘坐标系 $OXYZ$ 与水平面坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 共用同一坐标原点 O,坐标转换关系如图 4 所示,则侧向角 α 为底盘 X 轴方向与水平面坐标 X_1 轴的倾角,纵向角 β 为底盘 Y 轴方向与水平面坐标 Y_1 轴的倾角,4 个顶点表示各辅助支撑装置位置。

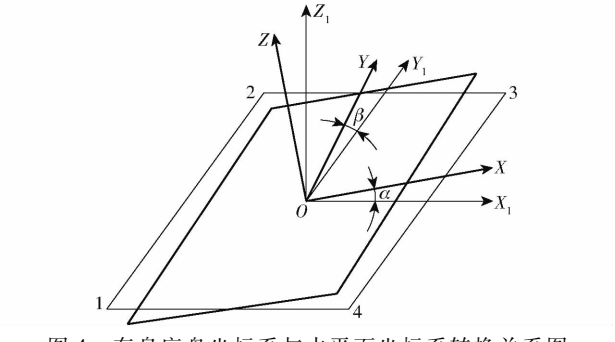

图 4 车身底盘坐标系与水平面坐标系转换关系图

Fig. 4 Conversion relationship diagram between body chassis coordinate system and horizontal plane coordinate system

当 α、β 都不等于 0°,与 X 轴倾角为 α 的坐标转换矩阵表示为

$$\boldsymbol{R}_1(X,\alpha)=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&\cos\alpha&-\sin\alpha\\0&\sin\alpha&\cos\alpha\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{R}_1$——三维空间变换矩阵

与 Y 轴倾角为 β 的坐标转换矩阵表示为

$$\boldsymbol{R}_2(Y,\beta)=\begin{bmatrix}\cos\beta&0&\sin\beta\\0&1&0\\-\sin\beta&0&\cos\beta\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{R}_2$——三维空间变换矩阵

得出变换矩阵

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}_1(X,\alpha)\boldsymbol{R}_2(Y,\beta)=\begin{bmatrix}\cos\beta&0&\sin\beta\\\sin\alpha\sin\beta&\cos\alpha&-\sin\alpha\cos\beta\\-\cos\alpha\sin\beta&\sin\alpha&\cos\alpha\cos\beta\end{bmatrix} \tag{3}$$

本文所设计的调平控制系统中,由于甘蔗转运车工作状态初始倾斜角度一般较小,转运前当 α 或 β 超过 ±8°,则系统自动报警,通知停止转运作业。因此可以忽略高阶项的影响,由极限定理近似认为:$\sin\alpha\approx\alpha$,$\sin\beta\approx\beta$,$\cos\alpha\approx\cos\beta\approx1$。则 $\boldsymbol{R}$ 可化简为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}1&0&\beta\\0&1&-\alpha\\-\beta&\alpha&1\end{bmatrix} \tag{4}$$

假设,在转运车底盘坐标系 $OXYZ$ 中,各辅助支撑装置坐标 P_i 为

$$P_i=(X_i,Y_i,Z_i)\quad(i=1,2,3,4) \tag{5}$$

则得出各辅助支撑装置在水平面坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 中的坐标 $P_i^{(1)}=\boldsymbol{R}P_i$,对应的转换关系为

$$P_i^{(1)}=\begin{bmatrix}1&0&\beta\\0&1&-\alpha\\-\beta&\alpha&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_i\\Y_i\\Z_i\end{bmatrix}\quad(i=1,2,3,4) \tag{6}$$

目前,采用辅助支撑结构进行调平的方法主要分为基于角度误差调平和基于位置误差调平。其中,基于位置误差调平常用于工程机械或传感器安装环境干扰较少的车型[21-24],需在支撑点处安装位移传感器测量装置行程。由于甘蔗转运车一般在田间进行甘蔗装卸,甘蔗收获季节又多为雨季,道路泥泞,转运车工作环境恶劣,位移传感器易受外界因素干扰,所以本设计采用数据获取较为稳定的角度误差调平方法。基于角度误差调平方法包括“追逐式”调平策略和“定点不动”调平策略[25]。在调平过程中,由于甘蔗转运车负载吨位较大,液压系统存在一定的滞后性,故不宜有液压支撑装置下降的动作,所以采取“追逐式”策略中向最高点对齐的调平方法。以辅助支撑装置的初始最高点为基准,其余

辅助支撑装置采用只伸长不收缩的方式追逐最高点，通过检测搜索闭环控制，使各支撑点与初始最高点处于同一水平高度，以达到调平的目的。由式(6)可得各个支撑装置在水平面坐标系 $OX_1Y_1Z_1$ 中 Z_1 轴方向的坐标为

$$Z_i^{(1)} = \begin{pmatrix} -\beta & \alpha & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad (i = 1,2,3,4) \quad (7)$$

因各个辅助支撑装置在车身底盘坐标系中 Z 轴的坐标值均为 0，可判断最高点支撑装置为

$$Z_i^{(1)} = -\beta X_i + \alpha Y_i \quad (i = 1,2,3,4) \quad (8)$$

“追逐式”调平策略过程如图 5 所示。

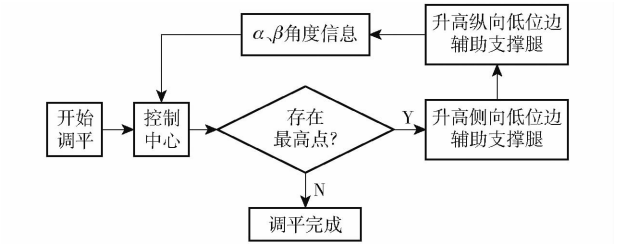

图 5　“追逐式”调平策略流程图

Fig. 5　“Chasing” leveling strategy flowchart

假设，车身初始状态如图 4 所示，则由 α、β 角度信息可判断辅助支撑装置 3 为最高点，为保护车体设备以及辅助支撑装置的刚性结构，调平动作要求降低对结构的破坏性影响，整个过程尽量平稳。本文采用的“追逐式”调平策略在车身调平过程中低位支撑点需有序向最高点靠拢，调平过程示意图如图 6 所示。平面 $ABCD$ 是 4 个支撑装置所构成平面，平面 $A'B'C'D'$ 是地理系绝对水平面，经过调整后平面 $ABCD$ 与平面 $A'B'C'D'$ 保持平行，且不改变点 C 初始位置。

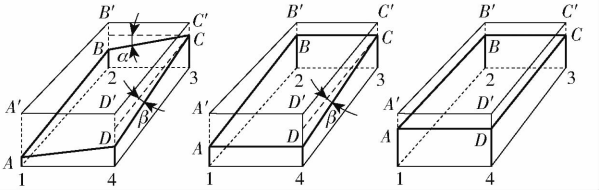

图 6　辅助支撑装置 3 为最高点时“追逐式”调平过程示意图

Fig. 6　Schematic of “chasing” leveling process when auxiliary support device 3 was at the highest point

首先，对危险性较大的车身低位侧向边进行调整，点 A 和点 B 同时上升至侧向角 $-z \leqslant \alpha \leqslant z$（$z$ 为默认车身处于水平状态的角度），此时点 B 与点 C 等高，点 A 与点 D 等高；其次对车身低位纵向边进行调整，点 A 和点 D 同时上升至纵向角 $-z \leqslant \beta \leqslant z$，此时点 A、B、C、D 等高，则由支撑装置所构成平面 $ABCD$ 与地理系水平面 $A'B'C'D'$ 保持平行状态。

两点同时上升的“追逐式”调平策略可避免液压四点支撑结构在非水平状态下着地调整时，因自身速度和位移的差距在调平过程出现“虚腿”的问题。增加车身稳定性和抗颠覆能力，缩短了调平时间，对车身底盘和辅助支撑装置液压缸起到缓冲作用，且液压系统电磁阀换向频率低，对电磁阀磁芯损害较小。

2.2　液压系统设计

液压系统原理图如图 7 所示，系统组成包括液压泵、溢流阀、三位四通电磁换向阀、二位二通常闭插装阀、车厢举升油缸、车厢门油缸、车厢翻转油缸和辅助支撑装置油缸等。

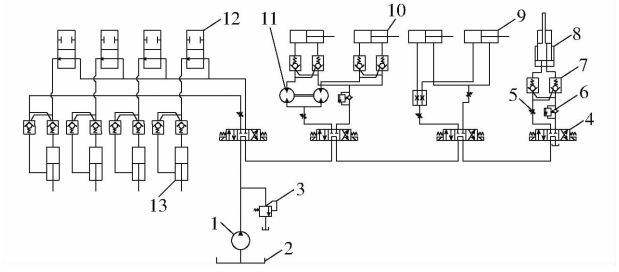

图 7　液压系统原理图

Fig. 7　Schematic of hydraulic system

1. 液压泵　2. 油箱　3. 溢流阀　4. 三位四通电磁换向阀　5. 单向节流阀　6. 平衡阀　7. 液压锁　8. 车厢举升油缸　9. 车厢门油缸　10. 车厢翻转油缸　11. 同步马达　12. 二位二通常闭插装阀　13. 辅助支撑装置油缸

整机液压系统动力来源为车载 24 V 蓄电池；采用 YUKEN 公司的 DSG03 型并联组合多路三位四通电磁换向阀，配合同型号的直动插装式溢流阀，防止系统过载；选用 4 个二位二通常闭插装阀对辅助支撑油缸进行独立控制，并加装液压锁实现辅助支撑装置保压功能。换向阀通过接收控制中心指令，对油液流向进行换向，进而实现对辅助支撑支路、车厢举升支路、车厢门支路和车厢翻转支路液压油缸的单独控制。

2.3　调平控制系统设计

甘蔗转运车调平控制系统的控制原理图如图 8 所示，α_0、β_0 和 p' 分别为车身侧向角、纵向角和各辅助支撑装置压力信息的目标值，α、β 和 p_i 分别为实际测得的车身侧向角、纵向角，以及压力变送器测得的各辅助支撑装置液压缸实际压力信息。

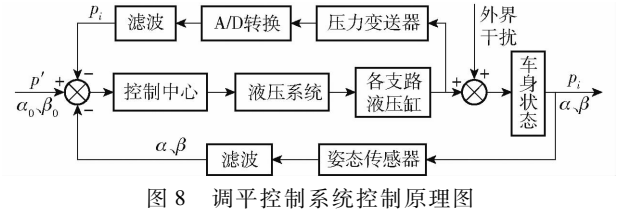

图 8　调平控制系统控制原理图

Fig. 8　Control principle diagram of leveling control system

控制中心通过 A/D 模块将压力变送器获取到

的各辅助支撑装置液压缸压电信号转换为数字信息;利用姿态传感器获取车身 α、β 角度信息;车身状态信息经过程序滤波处理后用于系统控制。控制中心根据当前车身状态信息,输出控制信号至液压系统,进而控制辅助支撑装置支路的三位四通电磁换向阀和二位二通常闭插装阀,通过辅助支腿动作调节转运车身恢复水平状态并消除“虚腿”。车身状态安全检测通过后,控制中心输出信号至液压系统,控制负责车厢提升支路、车厢门支路和车厢翻转支路的电磁换向阀,改变车厢状态完成卸蔗动作,等待下一次转运指令。

2.3.1 硬件设计

作为剪叉式甘蔗转运车调平控制系统的核心部件,控制中心需对获取的各类信息进行高效实时处理。选用 STM32F103ZET6 芯片作为核心模块,可搭配液晶屏编程实现可视化设计。姿态传感器选用维特智能公司的 WT901 型高精度三轴姿态传感器,测量精度 0.05°。压力变送器选用与系统电路设计兼容的 PT210B 型压电式传感器,信号输出为 0 ~ 3.3 V,量程 0 ~ 8 MPa,精度等级 ±0.5% FS。系统电源由24 V 蓄电池配合压降模块构成。

2.3.2 软件设计

控制系统的核心部分是软件,直接影响系统的稳定性和精度。本设计采用 Keil μVision5 软件,使用 C++语言进行控制程序的开发。

甘蔗转运车调平控制系统软件主循环程序由各传感器的通信协议程序、可视化程序和车身状态自动控制程序 3 部分组成。程序启动后系统进行初始化,控制中心与姿态传感器通过串口 TTL 方式通信,通过 A/D 模块转换方式采集压力变送器信息。检测各传感器通信正常后,将获取到的车身状态信息存放至内存缓冲区并实时更新,可视化程序和车身状态自动控制程序对缓冲区内信息进行读取;转运指令发出后,车身状态自动控制程序根据读取到的数据进行判定,发送指令至液压系统,完成甘蔗转运所需动作;在卸蔗过程中控制系统对车身状态不断循环检测,当超出安全范围时,系统立即停止所有动作并发出报警信号,等待操作员处理。主程序流程图如图 9 所示,程序运行过程中,通过中断优先级管理实现各部分程序运行互不影响。

2.3.3 滤波设计

控制系统需实时获取车身姿态信息,而工作中转运车会不可避免地出现振动干扰,从而对控制的准确性产生一定影响。为增加信号曲线的平滑度,针对控制系统数据获取频率较高、采样周期短的特点,在程序内采用加权递推平均滤波方法[26]对姿态传感器数据进行处理,调整系统对当前所受干扰的灵敏度。滤波后车身姿态角度对比效果如图 10 所示,数据平滑度较好,可增加控制系统的鲁棒性。

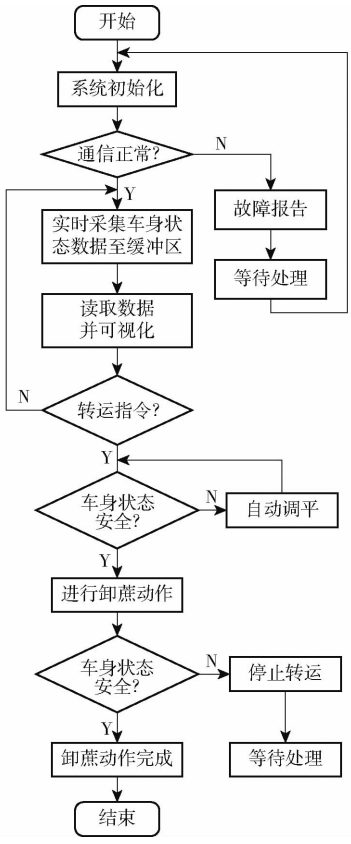

图 9 控制主程序流程图

Fig. 9 Control main program flow chart

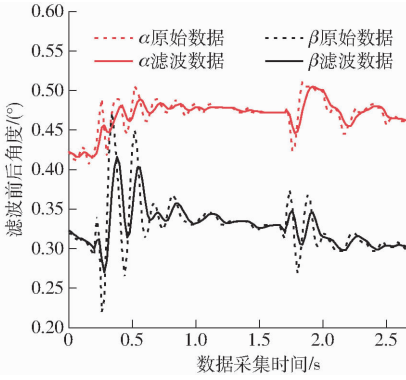

图 10 角度数据滤波前后变化曲线

Fig. 10 Comparison chart of fluctuation of angle data before and after filtering

压力变送器自身电荷漂移会产生测量误差,针对含有噪声的压力信号,采用小波软阈值去噪[27]的方法对压力信号进行处理。为确定最佳小波基,本文在大量仿真计算的基础上,进一步选取了去噪效果较好的 db$N$(N 取 4)、coif$N$(N 取 4)、sym$N$(N 取 4,8)小波基进行去噪处理分析,在分解尺度为 4 时不同类型小波基去噪效果对比如表 1 所示。

表 1　不同类型小波基的去噪效果

Tab.1　Denoising effects of different types of wavelet bases

评价方法	含噪信号	小波基类型			
		db4	sym4	coif4	sym8
均值/MPa	0.688 8	0.688 8	0.688 8	0.688 7	0.688 8
标准差/MPa	0.309 0	0.304 7	0.301 7	0.305 5	0.296 6

由表 1 可知，不同类型小波基的均值去噪后与原样本差别不大，而标准差有显著差异，采用 sym8 小波基去噪后标准差由去噪前的 0.309 0 MPa 减小到 0.296 6 MPa，去噪效果最为显著。所以本文采用 sym8 小波函数去噪的方法对压力传感器数据进行滤波处理，从而提高排除“虚腿”的控制精准性，滤波前后的转运车辅助支撑装置受力情况对比如图 11 所示。结果表明：经滤波处理后压力数据清晰度明显提高，有明显的局部分辨特性，提高了实时控制的有效性和可靠性。

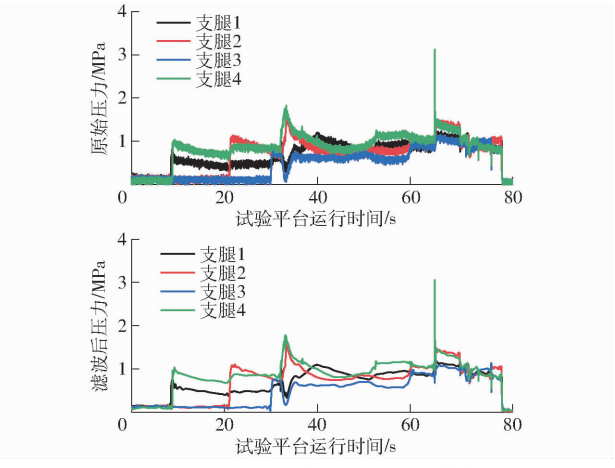

图 11　采用 sym8 小波基去噪压力数据对比

Fig. 11　Denoising effect comparison chart of pressure data using sym8 wavelet base

3　试验

3.1　试验设备与器材

剪叉式甘蔗转运车样机如图 12 所示。



图 12　剪叉式甘蔗转运车样机

Fig. 12　Prototype of scissor type sugarcane transporter

为验证本文设计的甘蔗转运车调平控制系统可靠性，根据相似性原理，在实验室内按照与样机车厢 4∶1的比例建立了试验平台，如图 13 所示。平台整体长度 1 200 mm，宽度 530 mm，高度 1 000 mm（其中车厢高度为 530 mm）；车厢满载量为 120 kg（相当实际样机满载 7.88 t 计算，按照与样机满载量 64∶1的比例缩小的装载量），车厢提升后的试验平台高度为 1 650 mm。试验所需器材物品还包括装满水的矿泉水瓶（矿泉水瓶的外形、质量与甘蔗较为接近，存放时间久），用来进行模拟负载甘蔗和转运甘蔗过程的负荷试验，每瓶水为 0.55 kg，共 218 瓶水；采用角度垫块模拟转运车所处田间地面存在坡度和凹凸不平情况。



图 13　试验平台

Fig. 13　Test platform

3.2　试验与结果

试验分为平台稳定性控制和模拟甘蔗转运车自动转运控制 2 组试验。控制中心通过串口打印方式，在试验过程中同步向计算机端发送车身状态数据，数据采集频率为 50 Hz。

3.2.1　试验平台稳定性控制单因素试验

甘蔗转运车在卸蔗过程中会因为丘陵蔗地、道路不平等因素发生较大重心偏移甚至侧翻事故。如图 14 所示，利用试验平台进行单因素侧翻临界对比试验，考察转运车初始侧向角和辅助支撑装置侧向跨距对车身重心偏移的影响。实验室内地面为基本水平的刚性地面，使用角度垫块垫起辅助支撑装置，模拟因田间道路不平车身发生倾斜的情况，并保持无“虚腿”状态。设置平台车厢负载质量为 120 kg，向倾卸甘蔗一侧的方向垫起角度分别选取 0°、2°、

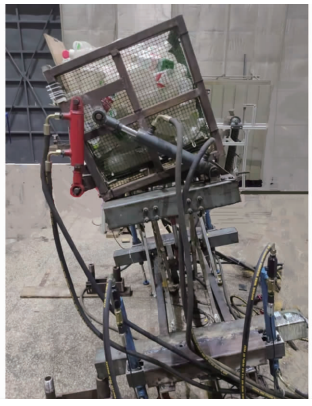

图 14　平台稳定性试验

Fig. 14　Platform stability test

4°、6°、8°;辅助支撑装置纵向跨距不变,单独改变其侧向跨距,跨距选取 490(490 mm 为等比例缩小后的轮胎跨距)、650、730 mm,进行单因素稳定性临界试验。在试验过程中关闭侧面车门,以模拟极端侧翻的工作状况,试验共 15 组,每组重复试验 3 次,试验全程对车身侧向角变化进行实时监测。模拟卸蔗过程的车身侧向角相较于未卸蔗前车身初始侧向角的平均绝对误差和均方根误差,如表 2 所示。

表 2 不同状态卸蔗过程试验平台角度稳定性误差

Tab. 2 Angular stability error of test platform in different states of sugarcane unloading process (°)

支撑装置侧向跨距/mm	误差参数	初始侧向角/(°) 0	2	4	6	8
490	平均绝对误差	0.016	0.030	0.040	0.055	0.748
	均方根误差	0.034	0.040	0.055	0.071	1.303
650	平均绝对误差	0.029	0.034	0.023	0.022	0.095
	均方根误差	0.036	0.039	0.031	0.032	0.106
730	平均绝对误差	0.026	0.015	0.013	0.040	0.051
	均方根误差	0.032	0.019	0.019	0.048	0.062

由表 2 可知,试验平台转运过程角度平均绝对误差和均方根误差随初始侧向角的增大呈上升趋势;随辅助支撑装置侧向跨距的增加呈下降趋势。不同初始状态的甘蔗转运过程试验平台重心最大偏移角对比如图 15 所示。

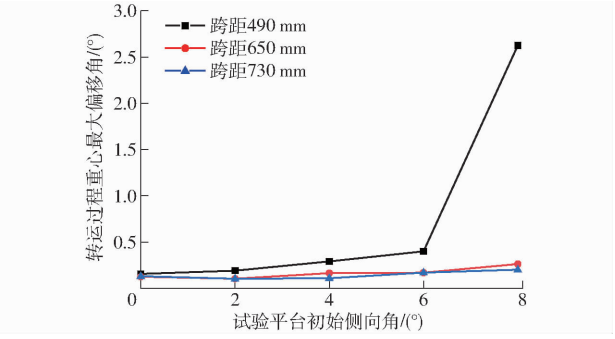

图 15 不同工况时的平台重心偏移角变化曲线

Fig. 15 Offset angle change curves of platform's center of gravity under different working conditions

由图 15 可知,平台卸蔗过程重心偏移角与初始侧向角成正比。在支撑装置侧向跨距 490 mm,初始侧向角 6°工况下,试验平台转运过程重心最大偏移 0.401°,处于危险临界状态并出现严重晃动;在支撑装置侧向跨距 490 mm,初始侧向角 8°工况下,试验平台转运过程重心最大偏移 2.625°,已经发生侧倾事故。仅使用轮胎结构作为支撑跨距,在大角度情况进行甘蔗转运发生危险的可能性较大;当增加辅助支撑装置跨距后,试验平台随跨距的增加趋于稳定。采用辅助支撑装置可有效减小甘蔗转运过程的危险性。

侧向跨距分别为 650、730 mm,初始侧向角分别为 0°、2°、4°、6°、8°工况下,试验平台向重心偏移方向的辅助支撑装置平均压力如图 16 所示。

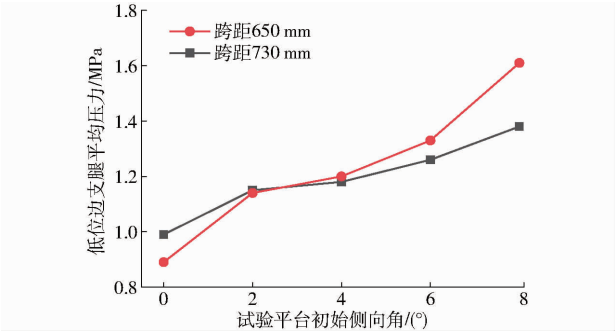

图 16 不同工况时支撑装置压力变化曲线

Fig. 16 Pressure change curves of support device under different working conditions

由图 16 可知,卸蔗过程中平台重心偏移方向的支撑装置所受压力与初始侧向角成正比,所以需要调整车身初始姿态角度,提高卸蔗过程车身稳定性。辅助支撑装置跨距 730 mm 相较于 650 mm 所受压力较为均匀,且考虑剪叉式甘蔗转运车在田间卸蔗时和大型集蔗车的并行间距问题,确定试验平台辅助支撑装置侧向伸展跨距 730 mm 为最佳跨距。

3.2.2 调平控制系统试验

在确保转运过程平稳性的前提下,综合考虑控制精度和效率,设定试验平台的侧向角和纵向角阈值均处在 ±0.6°范围内为默认水平状态,即当车身调平达到默认水平时,只需消除“虚腿”就可以进行卸蔗动作。设计 3 组不同倾斜状态下的调平控制试验进行可行性分析。

设置试验平台的初始侧向角为 -0.253°,纵向角为 0.115°,则平台处于默认水平状态。使用甘蔗转运车调平控制系统进行试验,系统判断车身状态不需调平,消除“虚腿”过程结束后,平台侧向角为 -0.170°,纵向角为 0.110°。转运过程中各车身状态参数变化如图 17 所示,可见调平后转运过程中支撑装置压力稳定,无“虚腿”出现,表明转运状态平稳。

如图 18 所示,在辅助支撑装置 3 下方放入干扰物体,模拟田间道路凹凸不平的情况。

设置试验平台向车厢卸蔗侧的初始侧向角为 -8.091°,纵向角为 0.308°,则平台处于侧向角需要调平,纵向角默认水平状态。经控制系统判断后,车身侧向角方向需进行调平,纵向角方向默认水平。调平结束后车身侧向角为 0.170°,纵向角为 0.346°,且消除了“虚腿”问题。转运过程中平台各状态参数变化如图 19 所示,可见车身调平后转运过程平稳。

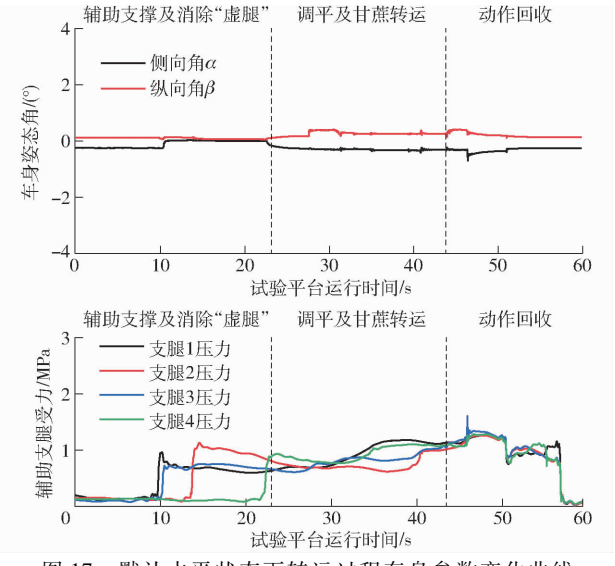

图 17　默认水平状态下转运过程车身参数变化曲线

Fig. 17　Changing curves of body parameters during transfer process in default level state

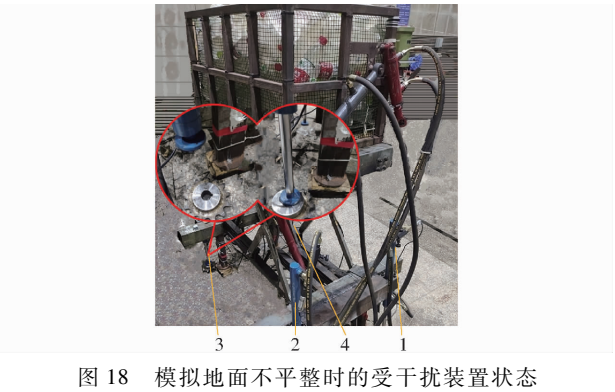

图 18　模拟地面不平整时的受干扰装置状态

Fig. 18　Simulated state of device with uneven ground

1. 辅助支撑装置 1　2. 辅助支撑装置 2
3. 辅助支撑转置 3　4. 辅助支撑装置 4

设置试验平台向车厢卸蔗侧的初始侧向角为 -3.961°，纵向角为 2.818°，则平台处于侧向角和纵向角均需要调平状态。经控制系统判断后，侧向角和纵向角方向均需辅助调平，调平结束后车身侧向角为 -0.297°，纵向角为 0.099°，且消除了“虚腿”问题。转运过程平台各状态参数变化如图 20 所示，可见车身调平后转运过程较平稳。

不同工况下的 3 组试验结果参数对比如表 3 所示。

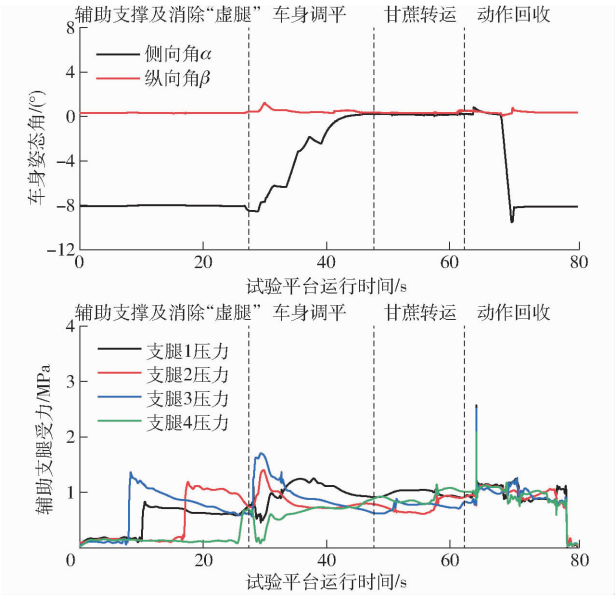

图 19　侧向角需要调整状态下转运过程车身参数变化曲线

Fig. 19　Changing curves of body parameters during transfer process when lateral angle needed to be adjusted

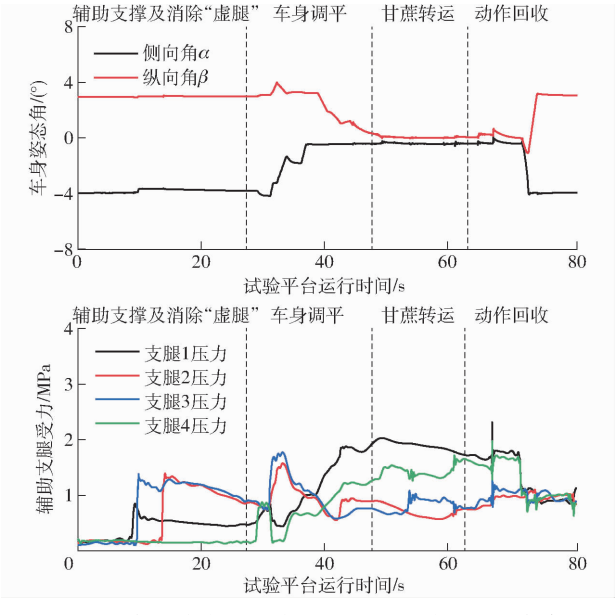

图 20　侧向角与纵向角均需调整时转运过程车身参数变化曲线

Fig. 20　Changing curves of body parameters during transfer process when both lateral angle and longitudinal angle needed to be adjusted

表 3　不同工况下试验结果参数对比

Tab. 3　Comparison of test results parameters under different working conditions

车身状态	初始侧向角/(°)	初始纵向角/(°)	卸蔗过程侧向角平均绝对误差/(°)	卸蔗过程侧向角均方根误差/(°)	触地及消除“虚腿”时间/s	车身调平时间/s	卸蔗及完成液压回收动作时间/s
默认水平	-0.253	0.115	0.049	0.055	23	0	32
侧向角需调平	8.091	0.308	0.050	0.059	26	20	35
侧向角纵向角都需调平	-3.961	2.818	0.041	0.056	28	20	35

试验表明,本文所设计的甘蔗转运车调平控制系统可在 20 s 内使试验平台在卸蔗前由倾斜状态调整至基本水平状态,调平精度在 0.3°范围内;控制系统进行自动卸蔗,车厢举升翻转和动作回收在 35 s 内完成;受地面干扰的情况下也可消除“虚腿”问题,并使试验平台在甘蔗转运过程中保持稳定。由文献[8-12]可知,农机具的调平精度要求一般在 1°范围以内,本文设计的调平系统可维持车身在 0.3°范围内,基本满足农机具设备的实际作业使用要求。

4 结论

(1)基于双剪叉式提升机构和四点辅助支撑装置,设计了一种剪叉式甘蔗转运车调平控制系统。该系统通过液压辅助支撑装置,采用“追逐式”调平策略对四点支撑结构进行调节,从而实现了对剪叉式甘蔗转运车的调平控制,减少了甘蔗转运过程中因外界环境造成的危险性;并通过液压系统实现对车厢举升、开门、翻转等转运动作的自动化控制,采用可视化车身状态监测和一键式控制,降低了人工劳动强度和操作难度。

(2)在试验平台稳定性试验中,处于危险临界状态的侧向角为 6°,侧向跨距为 490 mm;通过误差分析,表明了采用辅助支撑装置可减小试验平台在甘蔗转运过程中的危险性,侧向跨距 730 mm 为最佳辅助支撑装置跨距。在调平控制系统试验中,采用本文设计的调平控制系统,辅助支撑装置可在 28 s 内触地并排除“虚腿”,在 20 s 内完成车身调平,剪叉式转运车由初始倾斜状态至转运完成总过程保持在 80 s 内。其中,车厢举升翻转和动作回收在 35 s 内完成,满足 60 s 内完成车厢举升翻转和下降动作的设计要求;试验平台调平精度在 0.3°内,转运过程平稳,基本满足丘陵地区甘蔗转运作业的实际使用要求。

参 考 文 献

[1] 李明,田洪春,黄智刚. 我国甘蔗产业发展现状研究[J]. 中国糖料,2017,39(1):67-70.
LI Ming, TIAN Hongchun, HUANG Zhigang. Research on the development status of sugarcane industry in China[J]. China Sugar, 2017, 39(1): 67-70. (in Chinese)

[2] YINGGANG O, WENER M, DANTONG Y, et al. Mechanization technology: the key to sugarcane production in China[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2013, 6(1):1-27.

[3] BAI J, MA S, HUNG X, et al. A comparison study on mechanized sugarcane production modes in China[C]//2019 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019.

[4] 黄家伟,柴瑞谦,罗光钦,等. 新型拖拽式甘蔗转运车的设计及研发[J]. 大众科技,2015,17(7):47-49,75.
HUANG Jiawei, CHAI Ruiqian, LUO Guangqin, et al. Design and development of a new type of drag-and-drop sugarcane transport vehicle[J]. Popular Science,2015,17(7):47-49,75. (in Chinese)

[5] 甘耀海, 郑丁科, 刘庆庭,等. 甘蔗高位举升田间运输车的机构设计与分析[J]. 机床与液压,2014(22):22-26.
GAN Yaohai, ZHENG Dingke, LIU Qingting, et al. Design and analysis of height-lifting mechanism of transport vehicle in sugarcane field[J]. Machine Tools and Hydraulics,2014(22):22-26. (in Chinese)

[6] 樊秋菊,黄清玲,吴合槟,等. 国内外甘蔗收获机械化发展概况与前景[J]. 甘蔗糖业,2020,49(6):1-11.
FAN Qiuju, HUANG Qingling, WU Hebin, et al. Prospect and development of sugarcane mechanized harvest at home and abroad[J]. Sugarcane and Canesugar, 2020,49(6):1-11. (in Chinese)

[7] 李尚平,张伟,黄宗晓,等. 基于离散元法的自走式甘蔗转运车车厢稳定性研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):374-382.
LI Shangping, ZHANG Wei, HUANG Zongxiao, et al. Stability of carriages of self-propelled sugarcane transporters based on discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(2):374-382. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2002041&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.041. (in Chinese)

[8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):381-388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190742&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.042. (in Chinese)

[9] CHANGGAO X, HONGTU Y, JIANGYI H, et al. Research status and development trend of hilly mountain tractor leveling system[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10):130-136.

[10] 舒鑫, 蒋蘋, 胡文武,等. 高地隙植保机底盘调平系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2019, 45(3):321-326.
SHU Xin, JIANG Ping, HU Wenwu, et al. Design and test of the chassis leveling system for the high ground gap plant protection machine[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2019,45(3):321-326. (in Chinese)

[11] 彭贺，马文星，赵恩鹏，等. 丘陵山地轮式拖拉机车身调平系统设计与物理模型试验[J]. 农业工程学报，2018，34(14)：36－44.
PENG He，MA Wenxing，ZHAO Enpeng，et al. Design and physical model experiment of body leveling system for roller tractor in hilly and mountainous region[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(14)：36－44.（in Chinese）

[12] 姚宗伯，刘晋浩，张霞. 林用装备自动调平系统优化设计与仿真[J]. 东北林业大学学报，2020，48(6)：86－92，109.
YAO Zongbo，LIU Jinhao，ZHANG Xia. Optimization design and simulation analysis of automatic leveling system for forest equipment[J]. Journal of Northeast Forestry University，2020，48(6)：86－92，109.（in Chinese）

[13] 周浩，胡炼，罗锡文，等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：117－123.
ZHOU Hao，HU Lian，LUO Xiwen，et al. Design and experiment on auto leveling system of rotary tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(Supp.)：117－123.（in Chinese）

[14] 张盟，胡炼，可欣荣，等. 水田自走式喷雾机喷杆自动调平系统设计与试验[J]. 农机化研究，2019，41(10)：45－51.
ZHANG Meng，HU Lian，KE Xinrong，et al. Design and experiment of boom automatic leveling control system for self-propelled paddy sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2019，41(10)：45－51.（in Chinese）

[15] NAWALE S A，KADU V M，RANE S V，et al. Evaluation of tractor mounted laser guided land leveler[J]. International Journal of Agriculture Environment & Biotechnology，2008，1(3)：154－157.

[16] 吴帆，蒋蘋，胡文武，等. 牵引式作业机具自动调平控制系统的研究[J]. 河南农业大学学报，2020，54(3)：439－445.
WU Fan，JIANG Pin，HU Wenwu，et al. Research on the automatic leveling control system of the tractor[J]. Journal of Henan Agricultural University，2020，54(3)：439－445.（in Chinese）

[17] 郑永军，江世界，陈炳太，等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(11)：1－20.
ZHENG Yongjun，JIANG Shijie，CHEN Bingtai，et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(11)：1－20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201101&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.001.（in Chinese）

[18] 王韦韦，陈黎卿，杨洋，等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报，2021，52(8)：1－15.
WANG Weiwei，CHEN Liqing，YANG Yang，et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(8)：1－15. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210801&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.001.（in Chinese）

[19] 汤辉，陈建平. 六点支撑自动调平系统关键技术研究[J]. 火控雷达技术，2017，46(2)：65－68.
TANG Hui，CHEN Jianping. Study on key technology of 6-jack-supported automatic leveling system[J]. Fire Control Radar Technology，2017，46(2)：65－68.（in Chinese）

[20] KIM J S，LEE C S，KIM I W. System and method for controlling automatic leveling of heavy equipment：U.S. Patent 8，175，776[P]. 2012－05－08.

[21] 刘寒霜. 基于复杂环境下车载平台调平控制系统的研究[D]. 长沙：中南林业科技大学，2019.
LIU Hanshuang. Research on leveling control system of vehicle platform based on complex environment[D]. Changsha：Central South University of Forestry and Technology，2019.（in Chinese）

[22] 凌轩，王旭东，陈赛克. 雷达天线车液压升降系统同步控制仿真研究[J]. 机床与液压，2013，41(8)：81－83.
LING Xuan，WANG Xudong，CHEN Saike. Simulation analysis of synchronization control of hydraulic lift system for radar antenna truck[J]. Machine Tools and Hydraulics，2013，41(8)：81－83.（in Chinese）

[23] 孙江宏，何世凤，潘尚锋. 一种新型自动调平平台结构与控制系统设计[J]. 机械设计与制造，2015(7)：11－15.
SUN Jianghong，HE Shifeng，PAN Shangfeng. Structure and control system design of a new automatic leveling[J]. Platform Mechanical Design and Manufacturing，2015(7)：11－15.（in Chinese）

[24] 娄华威，杜春江，卜德岭，等. 雷达天线车液压自动调平系统设计与仿真研究[J]. 机床与液压，2019，47(19)：92－95，124.
LOU Huawei，DU Chunjiang，BU Deling，at al. Study on design and simulation of hydraulic automatic leveling system for radar antenna truck[J]. Machine Tools and Hydraulics，2019，47(19)：92－95，124.（in Chinese）

[25] 赵静一，杨宇静，康绍鹏，等. 自行式液压平板车四点支撑“面追逐式”调平策略的研究与应用[J]. 机床与液压，2015，43(15)：57－60.
ZHAO Jingyi，YANG Yujing，KANG Shaopeng，et al. Research and application of four-point support “flat chasing style” leveling strategy on self-propelled hydraulic transporter[J]. Machine Tools and Hydraulics，2015，43(15)：57－60.（in Chinese）

[26] TALEBI S P，WERNER S. Distributed Kalman filtering and control through embedded average consensus information fusion[J]. IEEE Transactions on Automatic Control，2019，64(10)：4396－4403.

[27] CHEN X，YANG Y，CUI Z，et al. Wavelet denoising for the vibration signals of wind turbines based on variational mode decomposition and multiscale permutation entropy[J]. IEEE Access，2020，8：40347－40356.