

履带自走式采茶机行走底盘通过性设计与试验

吴正敏^{1,2} 陈乐³ 汪义勇^{1,2} 罗坤⁴ 赖筱杰^{1,2} 张雪晨³ 曹成茂³

(1. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 合肥 230036; 2. 茶树生物学与资源利用国家重点实验室, 合肥 230036;

3. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 4. 铜陵学院机械工程学院, 铜陵 244061)

摘要: 针对复杂茶园环境下自走式采茶机行驶稳定性较弱等问题,开展了履带自走式采茶机行走底盘通过性能研究。采用 UGNX 12.0 对整车机构进行三维虚拟建模,通过 RecurDyn 开展多体动力学仿真,表明了空载和带负载状态下三角履带底盘可以满足设计需求,并对采茶机横向、纵向稳定性以及越障进行了理论分析,求解出最大爬坡角度及越障高度。通过无线控制系统设计,建立了蓝牙 APP 通信实现对底盘无线控制;在此基础上,设计了4条三角履带跨行自走式采茶机整机,该采茶机可以在田间自主行走,并对采茶机行走底盘进行了田间试验,试验结果表明,采茶机在试验场地满载时最大爬坡角度达 30°,最大越障高度为 340 mm,能够满足现阶段茶园行走通过性需求。

关键词: 采茶机; 履带自走式; 通过性; 越障

中图分类号: TH113.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)01-0474-10

OSID:



Design and Experiment on Traversability of Traveling Chassis of Crawler Self-propelled Tea Picker

WU Zhengmin^{1,2} CHEN Le³ WANG Yiyong^{1,2} LUO Kun⁴ LAI Xiaojie^{1,2} ZHANG Xuechen³ CAO Chengmao³

(1. School of Tea and Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Hefei 230036, China

3. College of Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

4. College of Mechanical Engineering, Tongling University, Tongling 244061, China)

Abstract: Aiming to address the challenges of weak driving stability in complex tea garden environments for self-propelled tea-picking machines, a study was conducted on the traversing performance of the crawler chassis of such machines. Utilizing UGNX 12.0, a three-dimensional virtual model of the entire vehicle mechanism was established, and multi-body dynamics simulations were performed using RecurDyn. These simulations demonstrated that the triangular crawler chassis designed can meet design requirements under both no-load and loaded conditions. Theoretical analyses were also conducted on the lateral and longitudinal stability of the tea-picking machine, as well as its obstacle-crossing capabilities. These analyses yielded solutions for the maximum climbing angle and obstacle-crossing height. Through the design of a wireless control system, Bluetooth APP communication was established to enable wireless control of the chassis. Based on this, a four-crawler, self-propelled, cross-row tea-picking machine was designed, capable of autonomous navigation in the field. Field tests were conducted on the traversing chassis of this machine, and the results indicated that when fully loaded, the tea-picking machine can climb angles up to 30° and cross obstacles with a maximum height of 340 mm, satisfying the current traversability requirements in tea gardens. This research can provide a theoretical basis and reference for the design of autonomous track chassis in hilly and mountainous areas.

Key words: tea picking machine; crawler self-propelled type; passing ability; overcoming obstacles

收稿日期: 2024-07-16 修回日期: 2024-09-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1601102)和国家自然科学基金项目(52105239)

作者简介: 吴正敏(1992—),女,讲师,博士,主要从事茶叶机械与智能化研究,E-mail: wzmin@ahau.edu.cn

通信作者: 曹成茂(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事特色经济作物装备研究,E-mail: caochengmao@sina.com

0 引言

传统茶叶采摘主要依靠人工完成,劳动强度大,效率低,茶叶采摘机械化成为中国茶产业发展的必经之路。目前,常用采茶机多为单人手持式和双人手持式^[1],部分较为标准的茶园也开始使用自走式采茶机^[2]。

目前国内外学者针对自走式采茶机展开了研究^[3-4]。秦广明等^[5]设计了一种自走式履带智能田间采茶机器人,通过自适应调节液压行走系统、智能机械手臂以及快速图像识别,实现名优茶叶自动化采摘。王攀等^[6]设计了4CJZ-1000型自走式履带采茶机,履带底盘采用拉压式操纵杆控制汽油机动力输出实现整机行走与停止,该机可由单人操作完成较平坦茶园夏秋茶采摘作业,采摘质量基本满足农艺要求。宋扬扬等^[7]设计出一种双履带智能采茶机,其升降机构保证了整机结构稳定性,实现了在丘陵恶劣环境下对不同茶树高度的采摘。汤一平等^[8]针对采摘面茶芽不能识别大小,提出了嫩茶自动识别和采茶刀自动调平调高的乘用式采茶机。尹俊方等^[9]设计研究了智能自走式采茶机,解决现有采茶机体验感弱、操作不便等问题。吴先坤^[10]根据安徽省茶园地形地貌及相关农机要求,设计一款适用于大部分茶园的茶叶采摘器。目前针对采茶机茶树嫩梢识别、采摘执行器、行走平台等多方面研究已经取得了一定成效^[11],但茶园多在丘陵山区,地形地貌复杂^[12-13],自走式采茶机底盘多存在适应性差、稳定性不好等问题^[14]。

底盘是行走装备的重要组成部分,能够支撑各种作业设备进行工作^[15]。履带底盘结构紧凑、转向半径小、机动灵活;具有较好的越障和爬坡能力,可适用于丘陵山地^[16-17]。履带式底盘类型主要有平行履带、倒梯形履带、三角形履带3大类^[18]。金诚谦等^[19]设计了一种全向调平履带底盘,采用铰链五杆结构,结合电液控制技术实现底盘横向与纵向的倾斜调整,提高了采摘机作业安全性。钱玉帅^[20]针对履带轮设计了一种车轮偏转角测量装置。张兆国等^[21]针对三七收获机履带底盘的液压系统和关键部件进行研究,设计液压缸液压杆伸缩来控制挖掘装置升降,且有效完成转向功能。履带底盘经常侧翻,而三角形具有稳定性,相较于平行履带极大提高其对地面稳定附着性^[22]。三角履带离地间隙高,常用于离地间隙大的环境,能满足茶叶跨行作业需求。

为提高自走式采茶机作业效果,本文设计一款双履带电动自走式采茶机行走底盘。通过三维虚拟

建模、理论计算和RecurDyn多体动力学仿真研究底盘可行性。针对茶园采摘作业实际工况,基于所设计的底盘设计自走式采茶机样机,并通过实地试验验证其在茶园的通过性。

1 整机结构设计

1.1 整机结构

根据丘陵地区采茶机设计依据和相关农艺要求,设计了4条三角履带自走式采茶机,整体结构如图1所示,主要包括履带底盘、行驶系统、传动系统、控制系统、采茶机机架和外部罩壳。

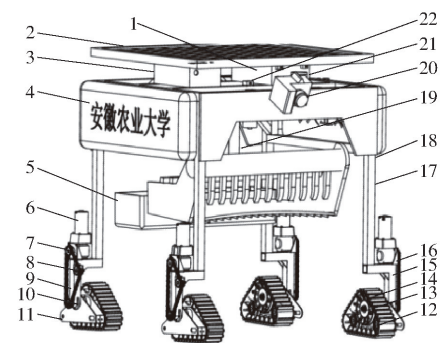


图1 整机三维结构图

Fig.1 3D modeling diagram of whole machine

- 1、3. 电池 2. 太阳能供电板 4. 罩壳 5. 收集盒 6. 电机
7. 齿轮 8. 张紧轮 9. 链条 10. 驱动轮 11. 履带板 12. 导向轮
13. 驱动轴 14. 主动轮 15. L形方管支架 16. 电机固定板
17. 整机支架 18. 采摘器 19. 电动推杆 20. 相机 21. 激光雷达
22. 姿态传感器

1.2 工作原理与主要参数

三角履带底盘轮采用链传动,该传动主要由三角履带、传动轴、齿轮、张紧轮、链轮、链条等构成。主动轮驱动轴带动电机上齿轮与链条上的张紧轮进行啮合运动,有前后2个导向轮辅佐主动轮进行工作。三角履带底盘结构如图2所示。

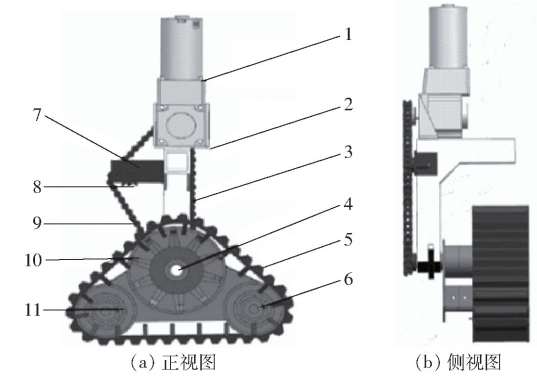


图2 三角履带底盘正、侧视图

Fig.2 Front and side views of triangular track chassis

1. 电机 2. 电机固定架 3. L形方管支架 4. 传动轴 5. 履带
6. 导向轮 7. 张紧轮固定板 8. 张紧轮 9. 链条 10. 主动轮
11. 履带钢板

一般总面积超过 60 m² 以上机械化茶园应设立主干道,机械化茶园设计目前主要产茶国主张行距为 1.5 ~ 1.8 m^[23],茶行长度理想状态为 80 m 左右,超过 15° 应设置梯田,梯面宽度最陡地段不小于 1.5 m,采茶机在茶园跨行工作示意图如图 3 所示。根据丘陵茶园环境要求,确定履带自走式采茶机技术参数如表 1 所示。

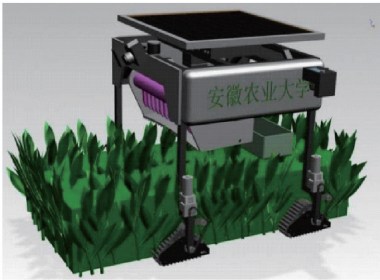


图 3 采茶机跨行作业三维模型

Fig.3 Three-dimensional model of tea picking machine across rows

表 1 三角履带式采茶机主要技术参数
Tab.1 Triangular crawler tea picker component parameters

参数	数值	参数	数值
整机长度/mm	1 300	整机质量/kg	200
主动轮直径/mm	188	最高离地间隙/mm	1 750
导向轮直径/mm	47	履带接地长度/mm	290
固定铁板宽度/mm	400	最大爬坡度/(°)	28
轴距/mm	1 300	整机高度/mm	1 750
驱动轴直径/mm	25	链轮直径/mm	38

2 通过性分析

2.1 直线行驶性能

采用四电机履带式底盘,行驶动力靠电机传动系统带动履带驱动轮,通过驱动轮轮齿与边缘履带齿啮合从而使三角履带向前提供动力。四电机履带式底盘实际在茶园行走过程中具有一定的阻力,运动过程中不可避免会产生弹性形变,茶园土壤因为机身重量导致土壤下陷,在土壤湿度较高情况下产生偏移,履带在与土壤接触过程中,不可避免会产生速度损失。因此,采茶机在茶园中直线行驶速度是确保其在茶园中进行高效采摘作业的关键^[24-25]。速度计算式为

$$v = (1 - s) v_z = \frac{60}{10^6} (1 - s) m_q z l = \frac{120 \pi}{10^6} (1 - s) m_q r_q$$

(1)

式中 v ——直线行驶速度,m/s
 v_z ——驱动轮带动的理论直线行驶速度,m/s
 s ——滑移率
 m_q ——驱动轮转速,r/min

z ——驱动轮齿数
 l ——履带节距,mm
 r_q ——驱动轮节圆半径,mm

由式(1)可知,随着驱动轮转速增加、驱动轮齿数增加、履带节距增加、驱动轮节圆半径增加、滑移率减小,四电机履带式底盘实际直线行驶速度增加。

2.2 爬坡性能

丘陵地区路况复杂且斜坡较多,采茶机在横向侧翻的概率较高^[26],丘陵山区地形多为横向坡度上又存在纵向坡度,即三维坡度。因此,需对采茶机在三维坡度上进行受力分析,以准确评估其稳定性^[27-29]。受力分析简图如图 4 所示。图中 G 为重力; G_1 为重力分力; M 为支撑力; M_1 为支撑力压横向方向分力; F 为摩擦力; F_1 为摩擦力沿纵向方向分力; α 为横向坡度; β 为纵向坡度。

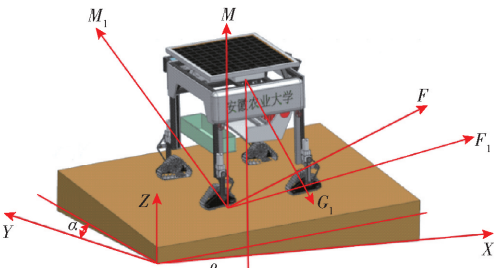


图 4 三维坡度受力分析简图

Fig.4 Schematic of three-dimensional slope force analysis

在三维坡度分析中,采茶机受到坡面对其的支撑力、摩擦力以及重力作用,为简化分析,将其进行分解,简化为纵向方向和横向方向的作用力,从横坡和纵坡 2 个方向分析其满载和空载时的稳定性。

2.2.1 横坡行驶时受力分析

采茶机满载时在斜坡上横向行驶时受力分析如图 5 所示。图中 O 为整机质心; M_2 、 M_3 为地面对左右履带支撑沿横向的支撑力; E_1 、 E_2 为履带接触地面作用的摩擦力; S 为两履带之间的距离; g 为质心偏移距离; h 为质心高度。

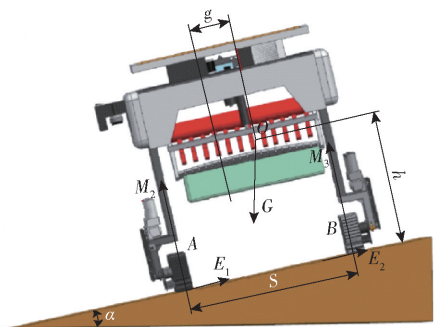


图 5 采茶机行驶时受力简图

Fig.5 Sketch of force of tea picker when driving

采茶机在横坡时匀速行驶,其整机受力集合为 O ,其整机力矩平衡,对点 A 取力矩可得

$$M_3S - G\cos\alpha \left(\frac{1}{2}S + g \right) + Gh\sin\alpha = 0 \quad (2)$$

式(2)变形后可得

$$M_3 = \frac{G\cos\alpha \left(\frac{1}{2}S + g \right) - Gh\sin\alpha}{S} \quad (3)$$

当采茶机在横坡上稳定行驶时, M_1 需要大于0,即

$$G\cos\alpha(0.5S + g) - Gh\sin\alpha > 0 \quad (4)$$

假设采茶机稳定行驶的极限横向坡度为 α_n ,当偏移量 g 为0时,可得

$$\alpha_n = \arctan \frac{\frac{1}{2}S + g}{h} = \arctan \frac{S}{2h} \quad (5)$$

通过对履带自走式采茶机的行走底盘相关参数进行计算,并代入式(5)得出:该底盘极限横向坡度会随着样机重心到地面垂直高度的降低而增加。当重心降低时,底盘横向稳定性得到提高, α_n 越大,横向稳定性能更优越。依据履带自走式采茶机行走底盘的结构尺寸进行计算,得出在满载状态下,该底盘能够顺利通过的横向最大坡度为 28° ;而在空载状态下,可增加至 33° 。表明该采茶机在不同载重条件下,均具备良好的爬坡能力,能够适应大部分茶园环境。

2.2.2 纵向行驶时受力分析

采茶机满载时在斜坡上纵向行驶时的受力分析情况如图6所示。

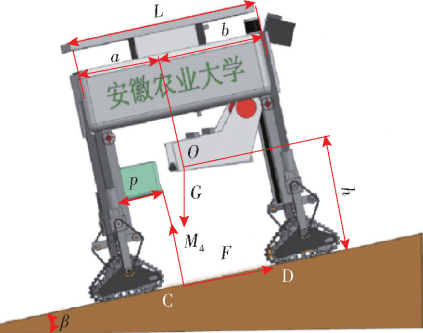


图6 采茶机上坡行驶时受力简图

Fig. 6 Schematic of force on tea picking machine when driving on slope

采茶机在纵坡匀速行驶时,整车受力处于平衡状态,平衡状态下其所受合力为0,对履带支撑腿A、B分别取力矩,上坡时对支撑腿B取力矩可得

$$G\cos\beta - Gh\sin\beta - M_4p = 0 \quad (6)$$

式中 p ——支撑轮C与垂直分力之间的距离,mm
 a ——支撑轮C到整机质心的距离,mm

M_4 ——地面对整车沿纵向方向的支撑力,N
竖直方向合力为0,即 $N_4 = G\cos\beta$ 。由式(6)得

$$p = \frac{a\cos\beta - h\sin\beta}{\cos\beta} \quad (7)$$

$$a\cos\beta - h\sin\beta = 0 \quad (8)$$

则 $\beta_{p1} = \arctan(a/h) \quad (9)$

式中 β_{p1} ——纵向上坡最大坡度角

$$\beta_{p2} = \arctan(b/h) \quad (10)$$

式中 β_{p2} ——纵向下坡最大坡度角

采茶机下坡行驶时受力简图如图7所示。

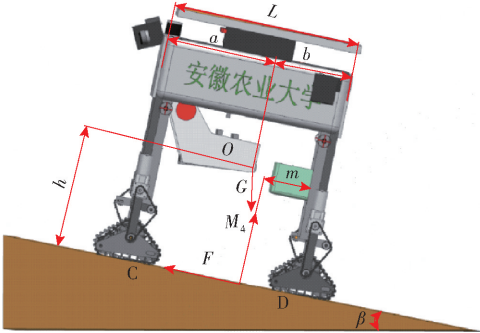


图7 采茶机下坡行驶时受力简图

Fig. 7 Sketch of force of tea picker when driving downhill

履带自走式采茶机行走底盘相关参数如表2所示,代入式(9)、(10)进行理论计算可得行走底盘上坡和下坡时最大坡度,坡度会随着样机重心到地面高度降低而增加,纵向上下坡角度最大时,纵向稳定性越高。计算得到履带底盘满载时,纵向上坡行驶极限坡度为 26.6° ,空载时纵向上坡行驶极限坡度为 30° ;纵向下坡满载时行驶极限坡度为 22° ,纵向下坡空满载时行驶极限坡度为 26° 。

表2 三角橡胶履带主要参数

Tab.2 Main parameters of triangle track mm

参数	履刺高度	厚度	宽度	接地长度	履带厚度
数值	11.8	20	125	1 160	45

2.3 越障性分析

采茶机越障能力是指样机在通过较高障碍物时能够达到的最大高度,根据采茶机实际越过障碍物情况,可以将越障能力分为3个阶段(图8):第1阶段,采茶机三角履带与坡桥障碍在点A接触,如图8a所示,此时由于牵引力推动的作用将采茶机进行旋转,随后一侧履带开始上升,开始进行越障;第2阶段,此阶段是决定采茶机能否成功越障关键阶段,在此阶段中,随着采茶机履带上升整机重心不断提高,采茶机慢慢向前移动时,履带底盘与地面夹角越来越大,随着采茶机的前移,整机主体中心恰好在台阶边缘正上方,此时状态属于临界状态,如图8b所示;第3阶段,采茶机质心作用线越过障碍边缘,采茶机重新回到水平面,此时采茶机完成越障如图8c所示。采茶机垂直越障高度计算式为

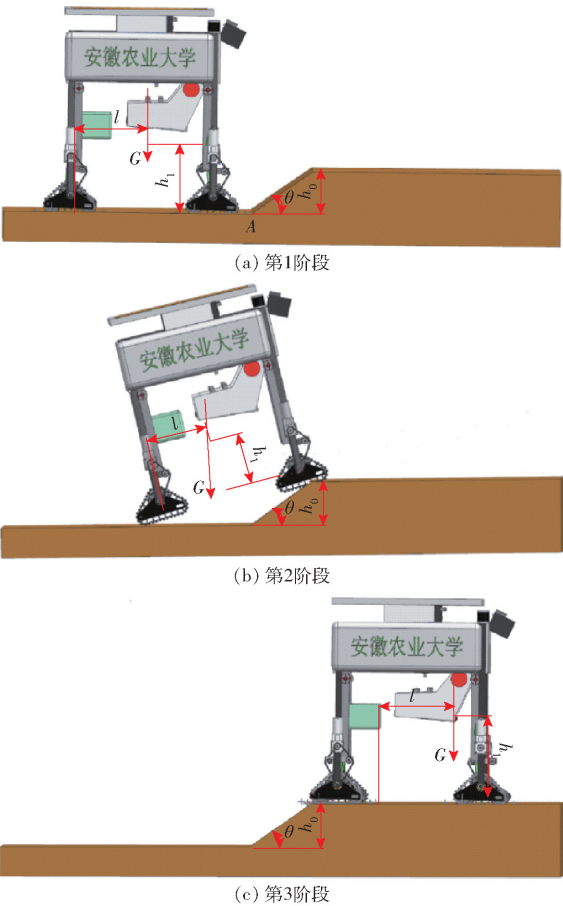


图 8 攀越垂直路障过程

Fig. 8 Climbing vertical barrier process

$$h_0 = (l - h_1 \tan \theta) \sin \theta \tag{11}$$

式中 l ——采茶机中心距离,mm
 h_0 ——垂直越障高度,mm
 h_1 ——采茶机纵向距离,mm
 θ ——攀越垂直地面与底盘夹角, (°)

根据式(11)和采茶机相关参数模拟出在越障过程中底盘与地面夹角 θ 、坡高 h_0 的受力简图如图8所示,随着车身前进,最先翻越履带一端与地面形成的夹角 θ 会根据采茶机做直线运动时越来越大,整机翻越时所产生的越障高度也逐步增加,履带到地面最斜坡方向时夹角最大,当夹角 θ 继续增大直至平面,障碍高度开始逐渐下降。

当样机成功越障时,满载情况下最大垂直越障高度可达 323 mm,空载状态下最大垂直越障高度 400. 5 mm,可为后续实地试验提供越障基础。

3 仿真试验

3.1 行驶通过性

在理论分析基础上,基于多体动力学仿真软件 RecurDyn 对履带自走式采茶机底盘行驶通过性能进行分析。以履带驱动轮轴中心为坐标原点,前进方向为 X 轴正方向,建立履带多体动力学模型,如

图 9 所示,整机由 1 个车体、4 个三角履带和 4 个链传动系统组成,包括 4 个电机、传动轴,利用 UGNX 12. 0 读取履带自走式采茶机三维模型导入仿真软件。自走式采茶机行走机构性能设计要求能够平稳直行、爬坡和越障,以匀速通过坡度 20°、25°、30°,基于以上坡度开展仿真。

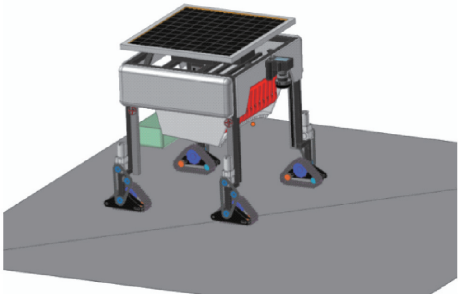


图 9 RecurDyn 建立的虚拟样机

Fig. 9 RecurDyn established virtual prototype

Recurdyn 中仿真样机直线行驶如图 10 所示,直线行驶曲线如图 11 所示,样机在直线行驶航向角曲线在 5. 5 s 内未产生明显偏移,6. 5 s 产生 2 mm 偏移量,在 13 s 产生最大偏移量为 3 mm。在设定平缓路面直线行驶时,航向角产生最大偏移量为 3 mm,偏移量变化平缓无大幅度抖动,偏移量较小可在茶行间距范围内作业。

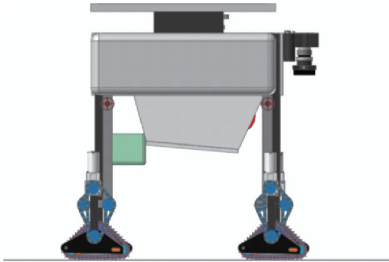


图 10 RecurDyn 采茶机直线行驶动力学仿真

Fig. 10 Dynamic simulation of straight-line driving of RecurDyn tea picking machine

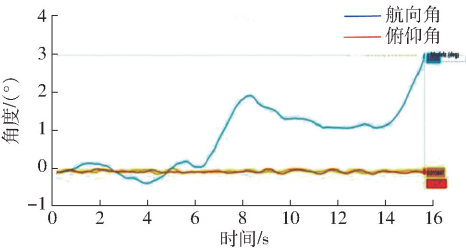


图 11 RecurDyn 采茶机直线行驶仿真结果

Fig. 11 Simulation results of RecurDyn tea picker traveling in a straight line

3.2 爬坡仿真

Recurdyn 中仿真样机 20°动力学爬坡示意图如图 12 所示,爬坡曲线结果如图 13 所示。在样机仿真分析中,航向角按照直线行驶并未发生较大偏移,在样机的操作过程中,若未引起显著的振动,表明其

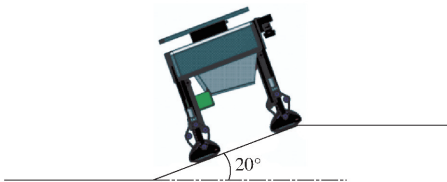


图 12 RecurDyn 采茶机 20°动力学爬坡仿真试验

Fig. 12 RecurDyn tea picker 20° dynamic climbing simulation experiment

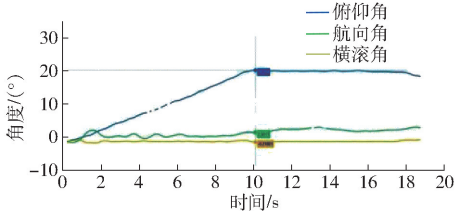


图 13 RecurDyn 采茶机 20°动力学爬坡仿真曲线

Fig. 13 RecurDyn tea picker 20° dynamic climbing simulation curves

横滚角控制得当。在设定坡度下能够成功翻越,俯仰角随样机在仿真模型逐渐递增直至最大坡度,变化平缓无剧烈抖动。

仿真样机 25°动力学爬坡如图 14 所示,爬坡曲线行驶结果如图 15 所示,可得在设定坡度下能够成功翻越,俯仰角随样机在仿真模型逐渐递增直至最大坡度,变化平缓未产生抖动现象。

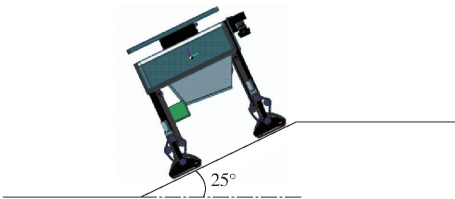


图 14 RecurDyn 采茶机 25°动力学爬坡仿真试验

Fig. 14 RecurDyn tea picker 25° dynamic climbing simulation experiment

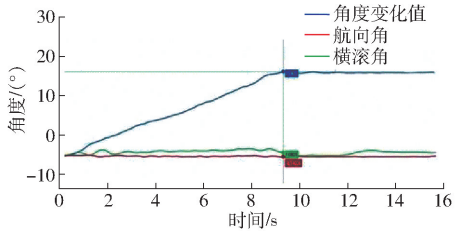


图 15 RecurDyn 采茶机 25°动力学爬坡仿真曲线

Fig. 15 RecurDyn tea picker 25° dynamic climbing simulation curves

仿真样机 30°动力学爬坡仿真试验如图 16 所示,爬坡曲线行驶结果如图 17 所示,可得在设定坡度下能够成功翻越,俯仰角随样机在仿真模型逐渐递增直至最大坡度,变化平缓无剧烈抖动。

3.3 越障仿真试验

图 18 为采茶机翻越障碍路况姿态变化,第 1 阶

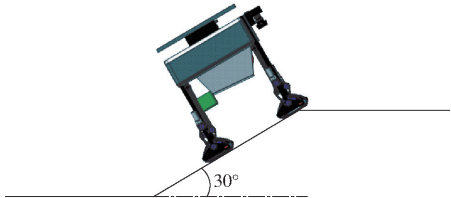


图 16 RecurDyn 采茶机 30°动力学爬坡仿真试验

Fig. 16 RecurDyn tea picker 30° dynamic climbing simulation experiment

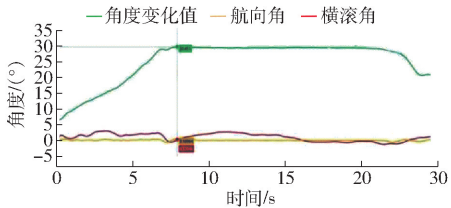


图 17 RecurDyn 采茶机 30°动力学爬坡仿真曲线

Fig. 17 RecurDyn tea picker 30° dynamic climbing simulation curves

段在平面路况下准备越障,第 2 阶段进行翻越运动状态,第 3 阶段完成越障作业。由图 19 可知,在设定的 350 mm 垂直障碍时,俯仰角产生的角度变化,起初翻越前曲线平缓,在第 9 秒时曲线逐渐递增至 33°左右,第 9 ~ 16 秒时到达最高翻越高度并未发生倾翻,在完成越障作业时,俯仰角逐渐递减直至完成越障,样机在翻越最高理论障碍高度时未发生倾翻和滑倒等现象,为后续实地试验验证样机适用性提供理论参考。

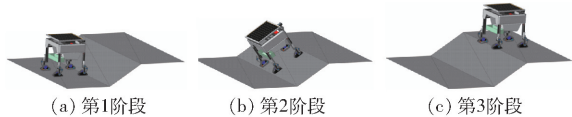


图 18 RecurDyn 采茶机翻越障碍路况姿态仿真试验

Fig. 18 RecurDyn tea picker over obstacle road attitude simulation experiments

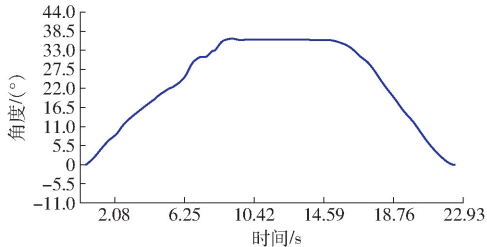


图 19 RecurDyn 采茶机翻越障碍仿真结果

Fig. 19 Simulation results of RecurDyn tea picker over obstacles

设定 5 种不同作业工况,直线行驶、坡度 20°、坡度 25°、坡度 30°、翻越 350 mm 障碍高度时达到俯仰角 33°,都能满足要求。但样机在实地茶园中翻越障碍的偏移量明显更大,这是由于茶园土壤组成成分存在差异性,障碍物分布不均匀导致履带偏移,但是这些偏差可在后续行走中进行姿态矫正,因此

能保证该采茶机在茶园间越障能力。

4 控制系统设计

设计了一套上位机软件系统,该系统基于 QT 框架,并与安卓手机应用程序相结合,构建了一个直观的用户界面(UI),以便于操作者便捷地发布底盘运动指令。此外,该软件系统具备与下位机进行无线数据交换的能力。下位机部分则采用 STM32 微控制器,它能够接收来自上位机的指令,并通过通用输入输出(GPIO)引脚对电机驱动板进行控制,如图 20 所示,从而驱动电机执行特定的动作指令。

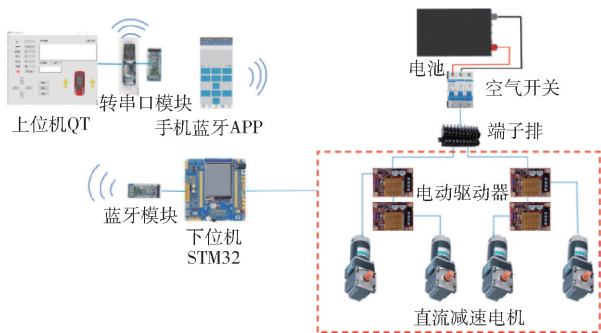


图 20 控制系统硬件接线图

Fig. 20 Control system hardware wiring diagram

本文主要控制底盘运动动作有前进、后退、左转向、右转向、刹车。在编写程序中,Z 和 F 分别对应正转反转,Z = 1, F = 0 为正转。控制运动主要指令程序如表 3 所示。

5 验证试验

5.1 爬坡试验

试验过程中样机直线行驶以速度 1 m/s 进入作业状态,以速度 0.5 m/s 进行爬坡作业,来回反复试验,通过姿态传感器返回数据绘制变化曲线,后将样机工作状态下俯仰角与仿真结果俯仰角对比,验证其仿真结果及实地试验结果是否吻合。图 21 为样机空载与满载图。

如图 22 所示,通过观察仿真和实地试验曲线结果,在设定坡度行驶平稳,仿真状态下爬坡作业数据

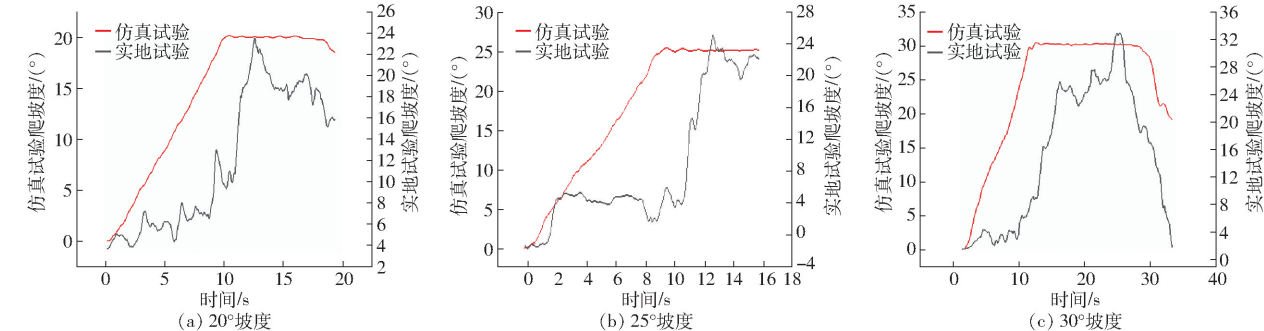


图 22 仿真与实地试验结果对比

Fig. 22 Comparison of simulation and field experiment results

表 3 部分运动操作指令

Tab. 3 Part motion operation commands

指令	GPIO 状态	电机状态	采茶机运 动状态
65	M1_Z = 0; M1_F = 0; M2_Z = 0; M2_F = 0; M3_Z = 0; M3_F = 0; M4_Z = 0; M4_F = 0	所有电机悬停	刹车
49	M1_Z = 1; M1_F = 0; M2_Z = 1; M2_F = 0; M3_Z = 1; M3_F = 0; M4_Z = 1; M4_F = 0	所有电机正转	向前走
50	M1_Z = 0; M1_F = 1; M2_Z = 0; M2_F = 1; M3_Z = 0; M3_F = 1; M4_Z = 0; M4_F = 1	所有电机正转	向后走
51	M1_Z = 1; M1_F = 0; M2_Z = 0; M2_F = 1; M3_Z = 1; M3_F = 0; M4_Z = 0; M4_F = 1	左侧电机反转 右侧电机正转	左转



(a) 样机空载 (b) 样机满载

图 21 样机空载与满载图

Fig. 21 Prototype no-load and full load diagrams

变化平缓逐渐递增,波动范围较小;实地试验时,由于地形环境路面凹凸不平及其他原因,姿态传感器绘制俯仰角曲线产生抖动,但都能够成功翻越设定坡度。通过图 22 预设坡度条件下样机均能成功完成爬坡试验。设定 3 种坡度工况下,实地试验俯仰角略大于仿真数据的原因,可能是姿态传感器因附近磁场干扰和车身抖动记录时产生偏差。通过实地试验结果与仿真结果对比,可以确认样机实地验证与理论计算相吻合,验证了样机具有一定的爬坡能力。

5.2 越障试验

为了全面评估履带底盘越障能力,进行了垄

间障碍及壕沟障碍通过性试验,考虑电机的扭矩输出以及摩擦力对试验结果的影响,为了确保试验安全性,选择半速进行越障操作,试验过程中,履带底盘行驶偏航角设定为 0° ,以速度 0.5 m/s 进行跨越壕沟及茶垄田埂试验,以保证其沿直线路径稳定行驶,从而准确评估其越障性能。图23a、23b为样机作业时在茶树行间壕沟障碍现场试验图,图23c、23d为样机在茶园经过茶园田垄空载和满载状态下的越障试验图,以验证样机在茶园通过的最大越障高度。

为提供更多数据依据,样机实地越障试验设置6个高度,分别为270、290、310、330、340、380 mm。试验结果如表4所示,在设定不同障碍高度时,样机均能成功完成越障,实地翻越障碍试验可达样机理论计算出满载时最大越障高度323 mm,当成功翻越高度340 mm时样机自身倾斜角达到 30° ,但并未发生侧翻。

在跨越壕沟及越障作业时,样机角速度曲线出现一定波动,且曲线变化幅度较为显著,如图24所示。这种差异源于多种因素,例如实际地形不平整

性和土壤不均匀性。



图23 样机越障作业试验现场

Fig. 23 Prototype of over-the-road operation test site

表4 样机通过不同越障高度测试结果

Tab. 4 Test results of prototype through different obstacle heights

越障高度/mm	270	290	310	330	340	380
试验结果	成功	成功	成功	成功	成功	失败

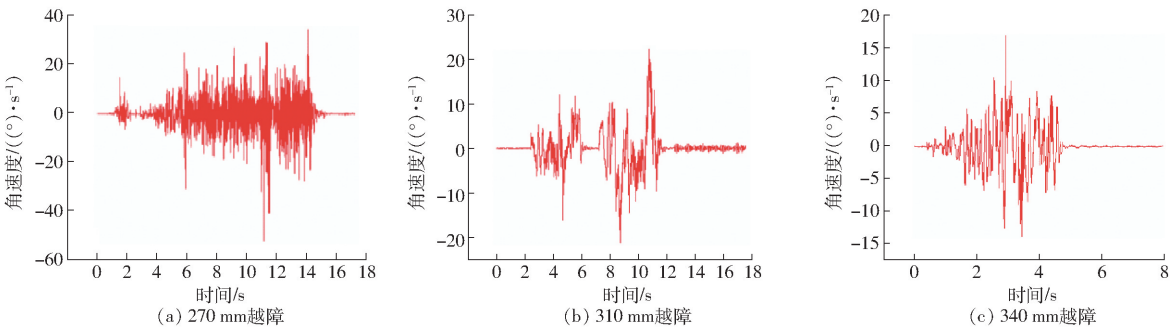


图24 跨越不同障碍时角速度曲线

Fig. 24 Angular velocities when crossing different obstacles

6 结论

- (1)对三角履带底盘关键部件进行了设计并制定了采茶机整机的设计方案,并运用UGNX 12.0建立了整机三维模型。
- (2)对底盘的直线行驶性能、转向性能、爬坡性和越障性能进行了分析,得到横向坡度下空载和满载状态最大爬坡度分别为 33° 、 28° ;纵向上坡行驶极限爬坡度履带底盘空载和满载分别为 30° 、 26.6° ;纵向下坡行驶极限爬坡度履带底盘空载和满载分别为 26° 、 22° ;越障高度分别为405、323 mm。利用

RecurDyn 多体动力学仿真软件进行仿真,建立了样机虚拟仿真模型,通过设置不同坡度和直线偏移量验证理论分析结果的有效性,最终的仿真结果表明本文设计的三角履带底盘在空载和满载状态下可以满足设计要求。

- (3)开发了底盘控制系统,采用蓝牙实现无线通信,设计了采茶机样机,并在茶园进行了试验。重复实地试验表明底盘通过爬坡最大角度为 30° ,壕沟障碍条件下的可通过最大越障高度为340 mm,试验验证了样机稳定性和爬坡方面都符合前期理论计算结果,能够满足茶园行走通过性的需求。

参 考 文 献

[1] 李杨,董春旺,陈建能,等. 茶叶智能采摘技术研究进展与展望[J]. 中国茶叶,2022,44(7): 1-9.
LI Yang, DONG Chunwang, CHEN Jianneng, et al. Research progress and prospect of intelligent tea picking technology[J]. China Tea, 2022, 44(7): 1-9. (in Chinese)

[2] 王小勇,汤丹丹. 茶叶采摘技术及采茶机械研究进展[J]. 茶叶学报, 2022, 63(4): 275-282.
WANG Xiaoyong, TANG Dandan. Research progress on mechanical tea plucking[J]. Acta Tea Sinica, 2022, 63(4): 275-

282. (in Chinese)
- [3] LI B, ZHU H C, FANG L X, et al. Design and experimentation of crawler tea harvesting machine[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2024,47(5):482–491.
- [4] HAN Y, XIAO H R, SONG Z Y, et al. Design and experiments of 4CJ–1200 self-propelled tea plucking machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021,14(6):75–84.
- [5] 秦广明,赵映,肖宏儒,等. 4CZ–12 智能采茶机器人设计及田间试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 152–156,169. QIN Guangming, ZHAO Ying, XIAO Hongru, et al. 4CZ–12 intelligent tea harvest robot design and field experiment[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 152–156,169. (in Chinese)
- [6] 王攀,易文裕,熊昌国,等.4CJZ–1000 型自走式采茶机的设计与试验[J]. 西南大学学报(自然科学版),2022,44(11): 228–233. WANG Pan, YI Wenyu, XIONG Changguo, et al. Design and experiment of 4CJZ–1000 self-propelled tea picker[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022,44(11):228–233. (in Chinese)
- [7] 宋扬扬,李为宁,李兵,等.履带式智能采茶机的设计与试验[J]. 农机化研究,2020,42(8):123–127. SONG Yangyang, LI Weining, LI Bing, et al. Design and experiment of crawler type intelligent tea picker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(8):123–127. (in Chinese)
- [8] 汤一平,韩旺明,胡安国,等. 基于机器视觉的乘用式智能采茶机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7): 15–20. TANG Yiping, HAN Wangming, HU Anguo, et al. Design and experiment of intelligentized tea-plucking machine for human riding based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):15–20. (in Chinese)
- [9] 尹俊方,孙虎,冉秋艺. 基于“人-机-环境”系统的智能名优采茶机设计研究[J]. 包装工程,2021, 42(12):183–190. YIN Junfang, SUN Hu, RAN Qiuyi. Design and research of intelligent famous tea picking machine based on “Man–machine–environment” system[J]. Packaging Engineering, 2021,42(12):183–190. (in Chinese)
- [10] 吴先坤. 履带自走式采茶机的设计研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2017. WU Xiankun. Design and experimental study on self-propelled tea-picking machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [11] 沈惠平,吉恩成,丁文芹,等. 6–DOF 混联采茶机器人机构设计与动平衡分析[J]. 农业机械学报,2023,54(5):416–426. SHEN Huiping, JI Encheng, DING Wenqin, et al. Mechanism design and dynamic balance analysis of 6–DOF hybrid robot for tea-picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(5):416–426. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 王法安,曹钦洲,李彦彬,等. 丘陵山区自走式马铃薯联合收获机设计与通过性试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 2):10–19. WANG Faan, CAO Qinzhou, LI Yanbin, et al. Design and trafficability experiment of self-propelled potato harvester in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 2):10–19. (in Chinese)
- [14] 郑航,傅童,薛向磊,等. 茶叶机械化采摘技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2023, 44(9): 28–35. ZHENG Hang, FU Tong, XUE Xianglei, et al. Research status and prospect of tea mechanized picking technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(9): 28–35. (in Chinese)
- [15] 刘德军,晁浚洪,苏俊锋,等. 履带自走式园林剩余物粉碎装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(6):722–731. LIU Dejun, CHAO Junqi, SU Junfeng, et al. Design and test of track self-propelled garden waste crushing device[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023,54(6):722–731. (in Chinese)
- [16] MOU X B, LOU Q, MA G J, et al. Simulation analysis and testing of tracked universal chassis passability in hilly mountainous orchards[J]. Agriculture, 2023, 13(7): 1458.
- [17] SUN Y X, XU L Z, JING B, et al. Development of a four-point adjustable lifting crawler chassis and experiments in a combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105416.
- [18] 张程. 温室用植保机械履带式底盘主要机构设计与研究[D]. 扬州:扬州大学,2018. ZHANG Cheng. Design and research on main mechanism of crawler chassis of greenhouse plant protection machinery[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 钱玉帅. 履带轮式移动平台转向分析及其自动驾驶系统设计[D]. 镇江:江苏大学,2021. QIAN Yushuai. Steering analysis and automatic driving system design of pedrail wheeled mobile platform[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[21] 张兆国,王一驰,李汉青,等. 液压控制履带自走式温室三七收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 127 – 135,158.
ZHANG Zhaoguo, WANG Yichi, LI Hanqing, et al. Design and test of hydraulic control tracked self-propelled greenhouse *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6):127 – 135, 158. (in Chinese)

[22] 李善军,陈辉龙,彭际博,等. 丘陵山地果园全液压遥控式履带动力底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2): 119 – 127,201.
LI Shanjun, CHEN Huilong, PENG Jibo, et al. Design and test of hydraulic remote control crawler power chassis for hilly and mountainous orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):119 – 127,201. (in Chinese)

[23] 董春旺,叶阳. 日本茶业科技考察分析[J]. 中国茶叶, 2013, 35(10):4 – 8.
DONG Chunwang, YE Yang. Investigation and analysis on science and technology of Japanese tea industry[J]. China Tea, 2013,35(10):4 – 8. (in Chinese)

[24] 张仕杰. 双电机水稻联合收获机履带式底盘设计与驱动功率试验[D]. 武汉:华中农业大学,2019.
ZHANG Shijie. Crawler chassis design and driving power test of double motor rice combine harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2019. (in Chinese)

[25] 雷志强. 履带式再生稻收割机底盘的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2017.
LEI Zhiqiang. Design and experiment of crawler type reproducing rice harvester chassis[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[26] 孙术发,任春龙,李涛,等. 基于履带式底盘的改进型森林消防车通过性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 61 – 67.
SUN Shufa, REN Chunlong, LI Tao, et al. Passability of improved forest fire truck based on crawler chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(17):61 – 67. (in Chinese)

[27] 邱威,丁为民,申宝营,等. 3WZ – 700 型果园喷雾机通过性能分析[J]. 农业机械学报,2012,43(6):63 – 67,146.
QIU Wei, DING Weiming, SHEN Baoying, et al. Performance analysis of 3WZ – 700 orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):63 – 67,146. (in Chinese)

[28] 王锋,杨玲,谢守勇,等. 一种三角履带式果园动力底盘的设计与研究[J]. 农机化研究,2019,41(5):91 – 96.
WANG Feng, YANG Ling, XIE Shouyong, et al. Design and research of a triangular track type orchard power chassis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(5):91 – 96. (in chinese)

[29] 王亚,陈思忠,李海涛,等. 高地面仿形性动力底盘的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(增刊):39 – 44.
WANG Ya, CHEN Sizhong, LI Haitao, et al. Design and experiment of dynamic chassis with high ground profile[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(Supp.):39 – 44. (in Chinese)