doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.07.038

丘陵果园履带式双侧协调摆臂动力底盘设计与试验

李善军[1,2]　钱震宇[1,2]　何志强[1,2]　董　晟[1,2]　吴正开[1,2]　李明震[1,2]
(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对丘陵果园传统农用动力底盘存在的整机通过性差、对复杂地形适应性不足等问题,设计了一款履带式双侧协调摆臂通用动力底盘,利用空间连杆机构的运动原理实现两侧履带行走系根据地形起伏协调升降摆动,并依靠液压系统为前置挂载机具提供作业动力。首先,根据丘陵果园地块分散、垄间通道狭窄的作业环境特征,完成整机尺寸与结构参数设计;其次,为增强底盘在复杂地形条件下的行驶稳定性,提出并设计了双侧协调摆臂机构,针对底盘关键部件进行结构设计;最后,针对丘陵果园典型工况开展底盘行驶稳定性分析,并对双侧协调摆臂履带底盘与常规履带底盘在崎岖路面的行驶姿态开展对比仿真分析和实地试验,结果表明:仿真验证了双侧协调摆臂机构对地形起伏具有良好适应性,试验进一步证明双侧协调摆臂履带底盘在崎岖路面的行驶稳定性较常规履带底盘提升 61.29%;动力底盘直线行驶偏移率为 4.03%,最小转弯半径为 725.8 mm;在坡度为 16°的路面可正常上下坡、横向行驶,无倾覆或滑移现象,越障过程平稳,满足丘陵果园作业行驶要求;挂载机构具备 -5°~32°的举升范围,可携带机具左右横移 100 mm,挂载除草机具作业时动力输出充足,且连续工作 2 h 液压油温上升较小,满足果园作业需求。

关键词: 丘陵果园; 动力底盘; 双侧协调摆臂机构; RecurDyn
中图分类号: S224.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)07-0416-11　　**OSID**:

Design and Test of Tracked Bilateral Coordinated Swing Arm Power Chassis in Hilly Orchards

LI Shanjun[1,2]　QIAN Zhenyu[1,2]　HE Zhiqiang[1,2]　DONG Sheng[1,2]　WU Zhengkai[1,2]　LI Mingzhen[1,2]
(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Traditional agricultural chassis have poor mobility and adaptability to hilly orchard terrain. To address this, a tracked bilateral coordinated swing-arm power chassis was developed, enabling adaptive track lifting and swinging via a spatial linkage mechanism, with hydraulic power supplied to front-mounted implements. Based on the operational characteristics of hilly orchards, such as dispersed plots and narrow inter-row passages, the overall configuration and dimensions were systematically designed. A bilateral coordinated swing-arm mechanism was proposed to enhance adaptability and driving stability on uneven terrain, and key components were optimized and matched to ensure coordinated operation. The chassis performance was evaluated through multi-body dynamic simulations and field experiments under typical hilly orchard conditions. Simulation results verified the strong adaptability of the proposed mechanism to terrain undulations, while experiments demonstrated that the driving stability on rough terrain was improved by 61.29% compared with that of a conventional crawler chassis. The developed chassis achieved a straight-line deviation rate of 4.03% and a minimum turning radius of 725.8 mm. It was capable of stable uphill, downhill, and lateral movement on slopes up to 16° without overturning or slipping and exhibited smooth obstacle-crossing performance. The implement mounting system provided a lifting range of -5°~32° and a lateral adjustment of 100 mm. During continuous weeding operations, sufficient power output and a low hydraulic oil temperature rise indicated reliable thermal behavior and suitability for long-term orchard applications.

Key words: hilly orchards; power chassis; bilateral coordinated swing arm mechanism; RecurDyn

收稿日期: 2025-09-30　修回日期: 2025-10-16
基金项目: 国家柑橘产业技术体系项目(CARS-Citrus)
作者简介: 李善军(1978—),男,教授,博士,主要从事水果智能化生产技术与装备研究,E-mail: shanjunlee@mail.hzau.edu.cn
通信作者: 李明震(1980—),男,讲师,博士,主要从事丘陵山地智能装备研究,E-mail: mingzhen_li@mail.hzau.edu.cn

0　引言

我国果园主要集中在丘陵山区，由于该区域地形复杂、地块分散，农业机械化水平远低于平原地区。受地形条件限制，传统农机装备难以适应国内丘陵果园作业环境，当前该区域主要依赖手扶山地拖拉机和微耕机进行作业，效率低下。因此，研究一款能够有效适应丘陵果园复杂地形的通用动力底盘，对丘陵果园机械化水平具有重要意义[1]。

丘陵果园地形复杂，农机作业时难以保持车身以及作业机具平稳导致作业质量不佳，因此底盘在复杂路面行驶过程中的稳定性十分重要。为提高底盘行驶稳定性，国内外研究者对山地农机调平系统进行了一系列研究[2]。LEONARD 研发的自动调平系统可通过车身倾角采集实现静态快速精准调平[3]；刘平义等[4]提出基于 Y 型可调悬架的主动调平底盘，以减少在崎岖路面上行驶作业过程中的底盘倾斜，但目前仅进行小比例样机试验，负载能力较弱；孙景彬等[5]设计的全向调平履带拖拉机采用平行四杆与双车架机构，实现横向与纵向调平，显著提升坡地行驶稳定性。

此外，履带式底盘在丘陵山区作业中具有适应性优势，国内外也有大量相关研究。ENERGREEN 公司设计的 RoboEVO 系列遥控履带式作业车辆采用快插设计，可搭配多种液压附件实现多功能作业。高巧明等[6]设计了一款全履带模块化无人农用动力底盘，其前置挂载模块和后置三点悬挂系统均可挂载多种机具使用；李善军等[7]设计了一款全液压遥控式履带动力底盘，可搭载多种果园作业机具。然而，上述研究仍存在调平系统结构与控制系统较为复杂、整机尺寸较大等问题，限制了其在丘陵果园中的推广与应用。因此，亟需设计一种结构更为简洁可靠、具备良好地形适应性且尺寸更小的动力底盘。

为提升底盘在丘陵果园的行驶稳定性，结合果园田间管理作业的实际需求，本文设计一款履带式双侧协调摆臂通用动力底盘，通过更为简单可靠的双侧协调摆臂机构提升底盘对复杂路面的适应能力。底盘采用电驱行走、液压作业的动力配置，在简化操作的同时保证多种前置挂载作业机具的动力需求。对底盘关键部分进行设计选型并完成整机加工，通过实机试验验证整机性能。

1　整机结构和工作原理

1.1　整机结构

履带式双侧协调摆臂动力底盘主要由电动履带底盘、液压动力输出系统、控制系统以及前置挂载机构组成，其中电动履带底盘包括机架和双侧协调摆臂机构，液压动力输出系统、控制系统以及前置挂载机构均安置在底盘机架上，其结构图如图 1 所示。

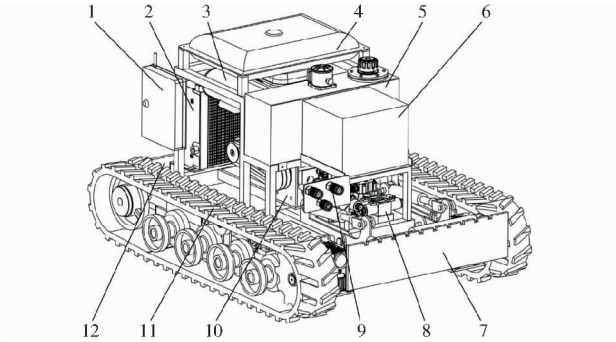


图 1　履带式双侧协调摆臂动力底盘结构图

Fig. 1　Structure diagram of tracked bilateral coordinated swing arm power chassis

1. 遥控接收机　2. 风冷式油冷却器　3. 汽油发动机　4. 汽油箱　5. 液压油箱　6. 动力电池　7. 前置挂载机构　8. 液压油路块　9. 液压快速接头　10. 双联齿轮泵　11. 电动履带底盘　12. 双侧协调摆臂机构

1.2　工作原理和主要技术参数

整机采用具备双侧协调摆臂机构的电动履带底盘，当单侧履带行走系为适应地形起伏变化摆动时，杆端关节轴承连杆带动承重板绕机架尾部铰接点转动，进而促使另一侧履带行走系反向摆动，实现两侧履带行走系的协调变化，从而提升整机对交错崎岖地形的适应能力。底盘机架上布置液压动力输出系统，为前置挂载机具提供作业动力。整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1　履带式双侧协调摆臂动力底盘主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of tracked bilateral coordinated swing arm power chassis

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 576×1 113×884
整机工作质量/kg	400
履带接地长度/mm	1 000
最小离地间隙/mm	80
汽油发动机功率/kW	16.5
行走电机功率/kW	1.5
最大遥控距离/m	100

2　底盘关键部件设计

2.1　电动履带底盘设计

电动履带底盘的主要作用是实现整机行走功能，同时具备一定适应地形起伏变化的能力，使其能够在丘陵果园的复杂地形条件下具备较好的稳定性。电动履带底盘结构图如图 2 所示。

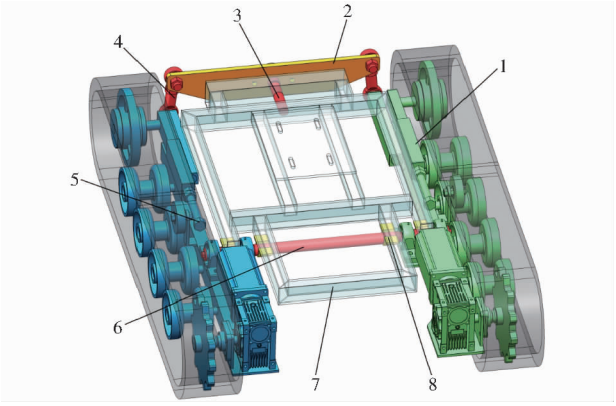


图 2 电动履带底盘结构图

Fig. 2 Electric track chassis structural diagram

1. 右侧履带行走系统 2. 末端承重板 3. 机架连接光轴 4. 杆端关节轴承连杆 5. 左侧履带行走系统 6. U 型扣 7. 前端承重轴 8. 机架

2.1.1 履带底盘行走系设计

设计履带底盘行走系必须考虑其在丘陵果园复杂地形条件下的稳定性和灵活性[8]。底盘采用普通型履带行走装置,具有良好的承载能力和行驶稳定性。其结构如图 3 所示。

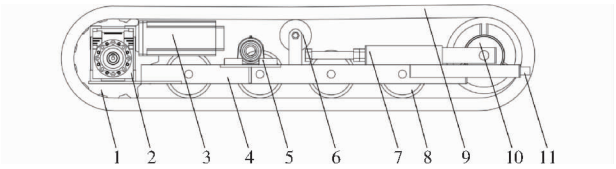


图 3 履带底盘行走系结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of crawler walking system

1. 驱动轮 2. 蜗轮蜗杆减速器 3. 行走电机 4. 摆臂履带架 5. 立式轴承座 6. 托带轮 7. 张紧装置 8. 承重轮 9. 橡胶履带 10. 张紧轮 11. 末端连接轴

2.1.2 双侧协调摆臂机构设计

电动履带底盘主要由机架和双侧协调摆臂机构组成,后者包括左右履带行走系、末端承重板、前端承重轴和杆端关节轴承连杆。承重轴经立式轴承座连接两侧履带行走系,杆端关节轴承连杆将履带行走系末端与承重板相连,构成双侧协调摆臂机构。机架通过尾部连接光轴、U 型扣与该机构固定,组成电动履带底盘。

为探究双侧协调摆臂机构两侧履带行走系旋转角度范围与所受负载之间的关系,通过对其中一侧履带行走系进行受力分析,计算得出两者关系式,机构极限变化下受力情况如图 4 所示。

令单侧履带行走系所受载荷总质量为 ω,所受履带支持力与摩擦力分别为 F_1、F_2,末端所受张紧反作用力为 F_3,前端所受驱动轮力矩为 M_e。以位于立式轴承座的铰接点 O 为原点,平行于行走系向右为 x 轴正方向,垂直于行走系向上为 y 轴正方向,

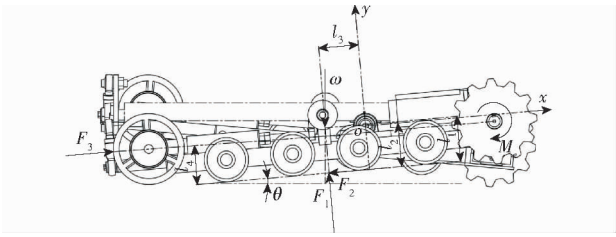


图 4 行走系活动范围与负载关系分析

Fig. 4 Analysis of relationship between range of motion and load of running system

建立平面坐标系。

铰接点 O 的力矩平衡方程为

$$-M_e - F_1 l_3 - F_2 l_2 + F_3(l_2 - l_4) + \omega g l_3 \cos\theta + \omega g(l_1 - l_2)\sin\theta = 0 \tag{1}$$

式中 l_1——单侧行走系重心到承重轮底部距离

l_2——铰接点 O 到承重轮底部距离

l_3——单侧行走系重心到 y 轴距离

l_4——张紧轮中心到承重轮底部距离

g——重力加速度

θ——单侧行走系绕铰接点极限旋转角度

其中张紧反作用力 F_3 与驱动轮力矩 M_e 分别为

$$F_3 = C\omega g \tag{2}$$

$$M_e = 9\,550\frac{P_a}{n_a}i \tag{3}$$

式中 P_a——驱动电机功率

n_a——驱动电机转速

i——电机减速器速比

C——张紧力经验常数

底盘受力平衡时 x、y 轴方向合力为零,可得

$$F_1 - \omega g\cos\theta = 0 \tag{4}$$

$$F_3 - F_2 - \omega g\sin\theta = 0 \tag{5}$$

将式(2)~(4)代入式(1)可得履带行走系旋转角度与所受负载之间的关系式为

$$\theta = \arcsin\frac{9\,550\dfrac{P_a}{n_a}i + C\omega g l_4}{\omega g l_1} \tag{6}$$

当电动履带底盘行驶于交错崎岖路面时,一侧履带行走系为适应地形变化,经立式轴承座绕铰接点旋转一定角度,并通过末端杆端关节轴承连杆带动承重板绕机架尾部铰接点转动,进而带动另一侧履带行走系反向旋转,实现整机对交错崎岖地形的被动适应能力。底盘姿态变化示意如图 5 所示。

2.2 液压系统设计

动力底盘液压系统的主要功能是驱动前置挂载作业机具进行横移和升降运动,并为挂在其上的作业机具提供工作动力。整机液压系统原理图如图 6 所示。

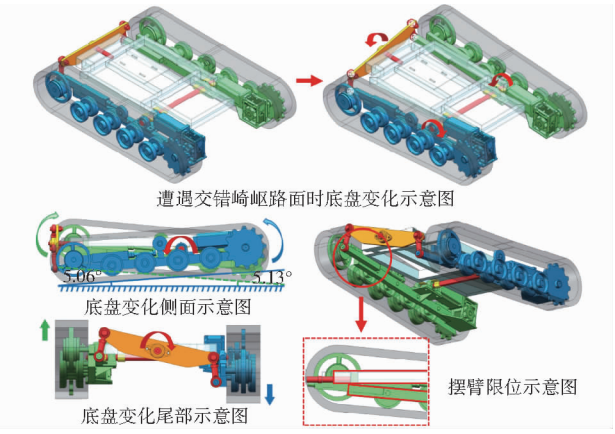


图 5　电动履带底盘变化示意图

Fig. 5　Schematic of changes in electric track chassis

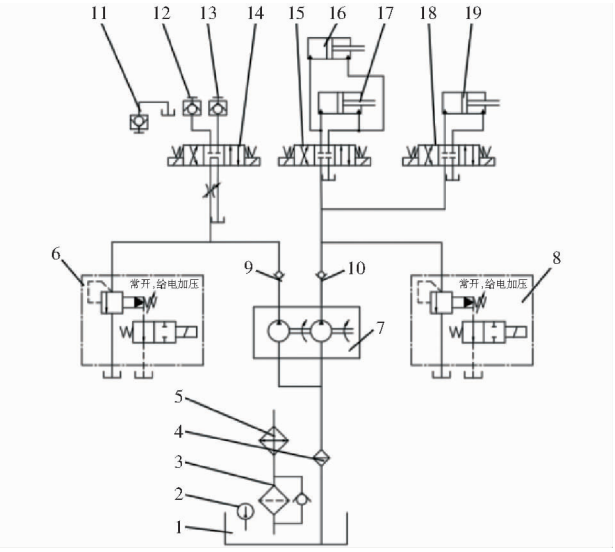


图 6　整机液压系统原理图

Fig. 6　Hydraulic system schematic of machine

1. 液压油箱　2. 温度计　3. 回油滤清器　4. 进油滤清器　5. 风冷式油冷却器　6、8. 先导式溢流阀　7. 双联齿轮泵　9、10. 单向阀　11、12、13. 液压快速接头　14、15、18. 电磁换向阀　16、17. 举升油缸　19. 横移油缸

3　动力底盘行驶稳定性能分析

在丘陵果园的复杂环境中，作业装备的连续性与作业安全高度依赖于动力底盘的行驶稳定性能[9]。因此，本文围绕底盘在纵向坡地、横向坡地、翻越障碍、跨越壕沟等典型山地工况开展行驶稳定性分析。

3.1　纵向坡地行驶稳定性

动力底盘的纵向坡地行驶稳定性是指动力底盘在纵坡行驶过程中不发生纵向倾覆和滑移的能力。纵坡行驶时，极限倾覆角和纵向滑移角是车辆稳定性的重要衡量指标[10]，动力底盘在纵向坡地行驶时的受力情况如图 7 所示。

整机受力平衡时，对张紧轮与地面接触点 A 列力矩平衡方程

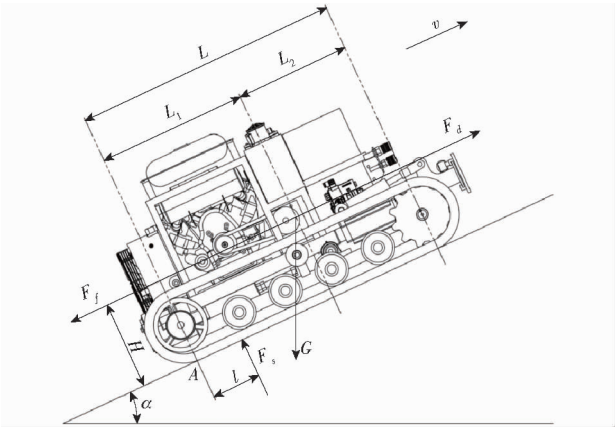


图 7　底盘纵向坡地受力分析

Fig. 7　Longitudinal slope force analysis of chassis

$$GH\sin\alpha_{max} + F_s l - GL_1\cos\alpha_{max} = 0 \tag{7}$$

$$F_s = G\cos\alpha_{max} \tag{8}$$

式中　F_s——地面对整机的支持力，N

G——整机重力，N

α_{max}——纵坡极限倾覆角，(°)

H——整机重心离地高度，mm

L_1——张紧轮中心与整机重心的距离，mm

l——张紧轮中心到地面支持力作用点的距离，mm

将式(8)代入式(7)可求得

$$l = \frac{L_1\cos\alpha_{max} - H\sin\alpha_{max}}{\cos\alpha_{max}} \tag{9}$$

当张紧轮中心与地面支持力的距离 l 为 0 时整机发生倾覆，可得纵坡极限倾覆角 α_{max} 为

$$\alpha_{max} = \arctan\frac{L_1}{H} \tag{10}$$

整机停在坡面时，不发生滑移的条件为地面纵向附着力大于整机重力的分力，即

$$\mu G\cos\alpha_d \geqslant G\sin\alpha_d \tag{11}$$

式中　α_d——纵坡滑移角，(°)

μ——履带与地面附着系数，取 0.68[11]

可得纵坡最大滑移角 α_{dmax} 为

$$\alpha_{dmax} = \arctan\mu \tag{12}$$

底盘的坡地纵向行驶极限稳定角度为极限倾覆角和最大滑移角中的最小值[12]，可得整机在纵向坡地行驶过程中保持行驶稳定性的最大角度 α 为

$$\alpha = \min(\alpha_{max}, \alpha_{dmax}) \tag{13}$$

3.2　横向坡地行驶稳定性

动力底盘的横向坡地行驶稳定性是指动力底盘在横坡行驶过程中不发生横向倾覆和滑移的能力。底盘在横坡行驶时受力情况如图 8 所示。

整机受力平衡时对点 B 列出力矩平衡方程

$$GH\sin\beta_{max} + N_2 D - GD_1\cos\beta_{max} = 0 \tag{14}$$

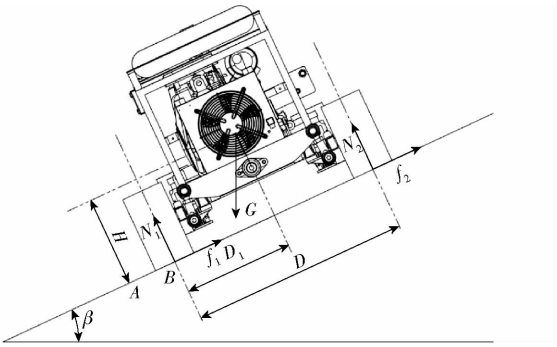


图 8 底盘横向坡地受力图

Fig. 8 Transverse slope force diagram of chassis

式中 N_2——地面对右侧履带的支持力,N

β_{max}——横坡极限倾覆角,(°)

D——履带轨距,mm

D_1——点 B 与整机重心的距离,mm

当地面对右侧履带的支持力 N_2 为 0 时整机发生倾覆,可得横坡极限倾覆角 β_{max} 为

$$\beta_{max} = \arctan\frac{D_1}{H} \tag{15}$$

整机停在坡面时,不发生滑移的条件为地面纵向附着力大于整机重力的分力,即

$$\mu G\cos\beta_d \geqslant G\sin\beta_d \tag{16}$$

式中 β_d——横坡滑移角,(°)

可得横坡最大滑移角 β_{dmax} 为

$$\beta_{dmax} = \arctan\mu \tag{17}$$

由此可得整机在横向坡地行驶过程中保持稳定性的最大角度 β 为

$$\beta = \min(\beta_{max}, \beta_{dmax}) \tag{18}$$

3.3 越障性能分析

动力底盘的越障性能是衡量其在复杂地形中通过能力的重要指标,其中翻越田埂与跨越壕沟被视为典型工况,能够有效反映底盘在丘陵山地果园环境下的适应性。

底盘在翻越田埂的过程中,若其重心达到最大俯仰角前越过田埂侧边缘线,能够顺利通过;反之则后倾失稳[12]。如图 9 所示,当动力底盘重力作用线与垂直边缘共线时,俯仰角 γ 达到最大值,此时翻越田埂的最大高度 h_{max} 为

$$h_{max} = (L_1 - H\tan\gamma)\sin\gamma \tag{19}$$

$$\gamma = \min(\alpha_{max}, \alpha_{dmax}) \tag{20}$$

式中 γ——越障最大俯仰角

底盘跨越壕沟的过程如图 10 所示。当动力底盘的驱动轮接触到壕沟另一侧时,重心应在壕沟近侧边界线内;当动力底盘张紧轮离开沟道边界线时,重心应越过壕沟近侧边界线[13]。

由此可知动力底盘能够跨越壕沟的最大沟宽

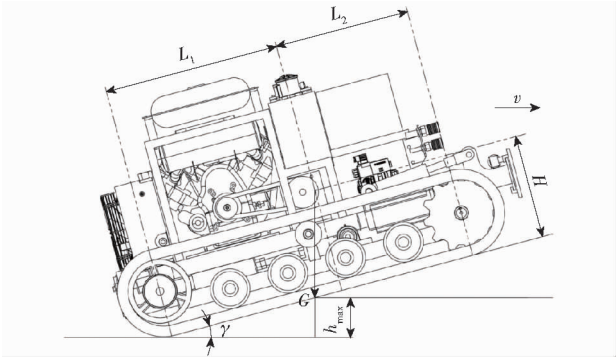


图 9 底盘翻越田埂过程图

Fig. 9 Process chart of chassis crossing field ridge

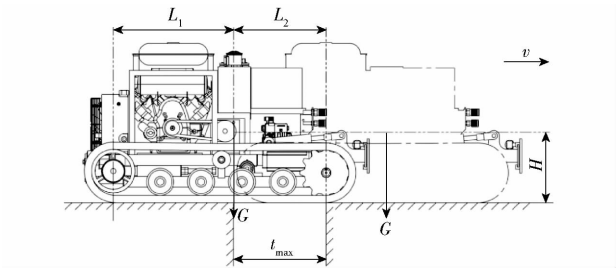


图 10 底盘跨越壕沟过程图

Fig. 10 Process chart of chassis crossing trench

t_{max} 为

$$t_{max} = \min(L_1, L_2) \tag{21}$$

式中 L_2——驱动轮中心与整机重心距离

3.4 多工况动力学仿真分析

3.4.1 动力底盘多体动力学模型建立

为了进一步探究动力底盘在丘陵果园不同工况下的行驶稳定性,利用多体动力学软件 RecurDyn 低速履带仿真模块(Track - LM)对动力底盘虚拟样机在交错崎岖路面、纵向坡路、田埂壕沟等多工况下进行通过性仿真,x 轴正向为前进方向,y 轴正向为竖直向上方向,z 轴正向为前进方向右向,建立多体动力学模型。动力底盘虚拟样机如图 11 所示,模型参数如表 2 所示。

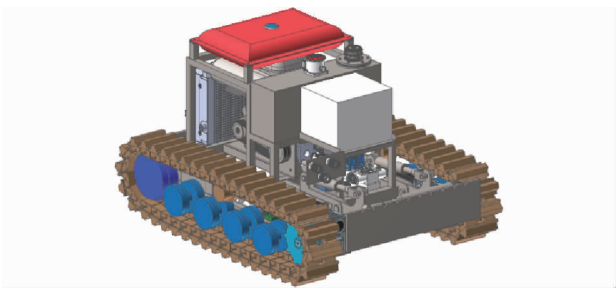


图 11 动力底盘多体动力学模型

Fig. 11 Multi-body dynamics model of power chassis

南方的丘陵山地因气候原因,土壤黏度大[14],因此将履带与地面的接触参数设置为软件中基于贝克理论(Bekker)的标准重黏土选项,路面参数如表 3 所示。

表 2　动力底盘多体动力学模型参数

Tab. 2　Parameters of multi-body dynamics model

参数	数值
模型质量/kg	417
驱动轮惯量/(kg·mm^2)	51 681
承重轮惯量/(kg·mm^2)	31 711
托带轮惯量/(kg·mm^2)	7 624
张紧系统刚度/(N·mm^{-1})	10 000
履带链节移动刚度/(N·mm^{-1})	10 000
履带链节旋转刚度/(N·mm·(°)$^{-1}$)	30 000

表 3　重黏土路面参数

Tab. 3　Parameters of heavy clay pavement

参数	数值
内聚性沉陷模量/(N·mm^{-n-1})	5. 173 7
摩擦性沉陷模量/(N·mm^{-n-2})	0. 633 86
沉陷指数	0. 13
内聚力/kPa	0. 068 95
内摩擦角/(°)	34
剪切变形模量/mm	25
沉陷比	0. 05

3. 4. 2　通过交错崎岖路面仿真分析

丘陵果园地形复杂，起伏较多，其中较为常见的小型土坡和粘土砖的高度不超过 100 mm[11]。为探究双侧协调摆臂机构对于果园崎岖路面的适应性，在 Solidworks 中建立两侧交替起伏，凹陷与凸起幅度均为 100 mm 的崎岖路面模型导入 RecurDyn 中，模拟动力底盘通过复杂路面时的运动情况，如图 12 所示。

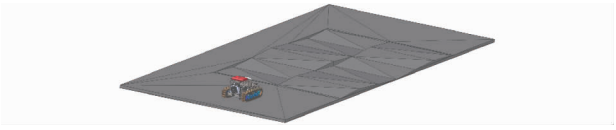


图 12　通过交错崎岖路面仿真分析

Fig. 12　Simulation analysis of passing through staggered rough roads

动力底盘以稳定速度前进，行驶过程中两侧履带行走系互相协调，围绕铰点正反向交替旋转，其角度变化范围在 -5° ~5°之间，如图 13 所示，证明该机构能够有效协调两侧履带行走系统的姿态以适应交错崎岖路面。

为进一步验证该机构对复杂路面的适应能力，取消除驱动轮旋转副以外的运动副保持其他条件不变，建立不具备双侧协调摆臂机构的常规履带底盘模型进行对照仿真。仿真结果如图 14 所示。在相同工况下，具备双侧协调摆臂机构的动力底盘俯仰角峰值为 1. 35°，常规动力底盘俯仰角峰值为 3. 56°，且前者行驶过程中俯仰角和质心在 y 轴方向位移的变化幅度均明显小于后者，证明该机

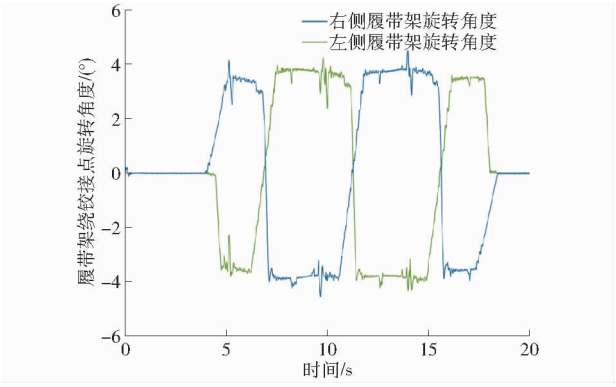


图 13　双侧行走系协调变化仿真结果

Fig. 13　Simulation results of bilateral walking system coordination change

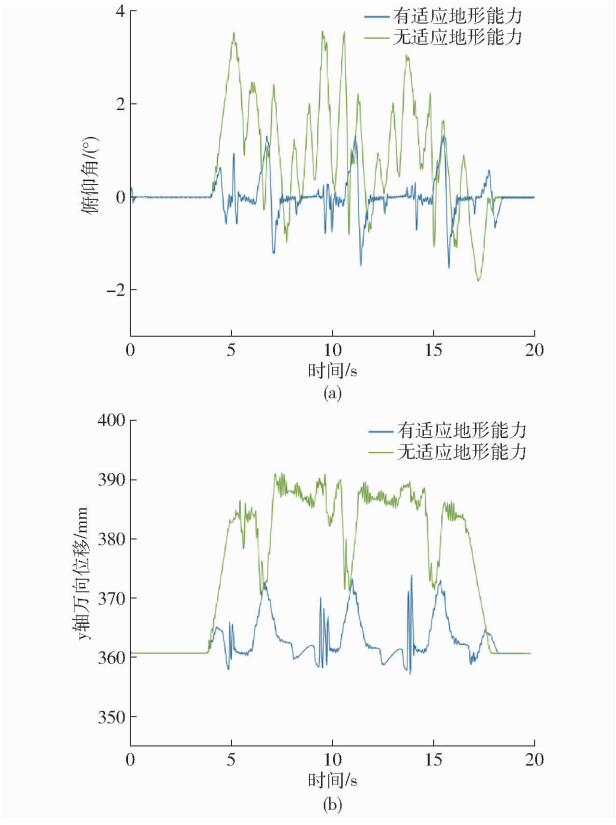


图 14　通过交错崎岖路面对照仿真结果

Fig. 14　Compare simulation results with staggered rough roads

构在底盘通过交错崎岖路面的工况下能够有效适应地形，提升了底盘在丘陵果园崎岖路面的行驶稳定性。

3. 4. 3　纵坡行驶稳定性仿真分析

丘陵山区 25°以上的陡坡地水土流失严重，不宜作为耕作地块[15]。因此在 Solidworks 中依次建立坡度为 10°、15°、20°、25°的纵坡路面模型导入 RecurDyn 中，模拟动力底盘在不同坡度下进行纵向爬坡的运动情况，如图 15 所示。

动力底盘以平稳速度进行纵向爬坡，仿真结果如图 16 所示。动力底盘在爬坡过程中，俯仰角随着

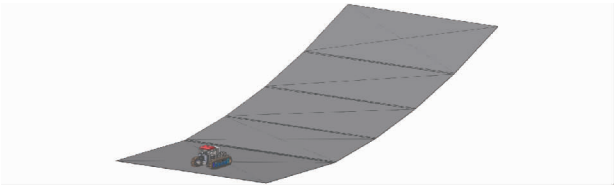


图 15 纵坡行驶稳定性仿真

Fig. 15 Simulation of driving stability on longitudinal slopes

坡度增大逐渐增大,且波动较小,翻滚角变化微小基本保持在 0°,证明动力底盘可通过 25°纵坡且稳定性较好,满足丘陵果园作业要求。

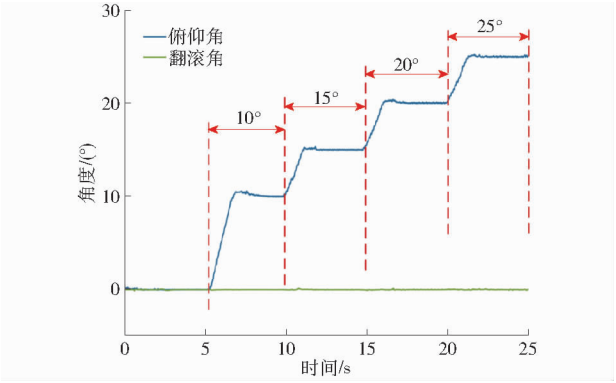


图 16 纵坡行驶稳定性仿真结果

Fig. 16 Simulation results of longitudinal uphill driving stability

3.4.4 横坡行驶稳定性仿真分析

在 Solidworks 中分别建立坡度为 15°、20°、25°的横坡路面模型导入 RecurDyn 中,模拟动力底盘在不同坡度下进行横向爬坡的运动情况,如图 17 所示。

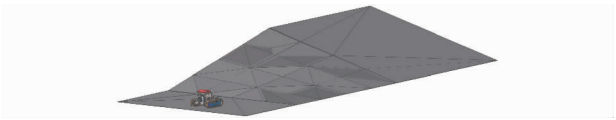


图 17 横坡行驶稳定性仿真

Fig. 17 Simulation of cross-slope driving stability

动力底盘以平稳速度在通过一段斜坡后进入横坡路面,随后开始横向爬坡,仿真结果如图 18 所示。在 3 种不同坡度的情况下动力底盘在 22 s 左右进入横坡,在 30 s 完成横向爬行,在横向爬坡过程中动力底盘的翻滚角分别保持在 15°、20°、25°且无明显波动,证明动力底盘在爬坡过程中没有发生横向侧倾现象,能够平稳通过 15°、20°、25°横坡,满足丘陵果园作业要求。

3.4.5 越障行驶稳定性仿真分析

在 Solidworks 中依次建立高度为 100、150、175、200、250 mm 的田埂模型导入 RecurDyn 中,模拟动力底盘翻越不同高度田埂的运动情况,如图 19 所示。

仿真结果如图 20 所示,动力底盘在开始翻越田埂的过程中俯仰角从 0°开始增大,随后在离开田埂

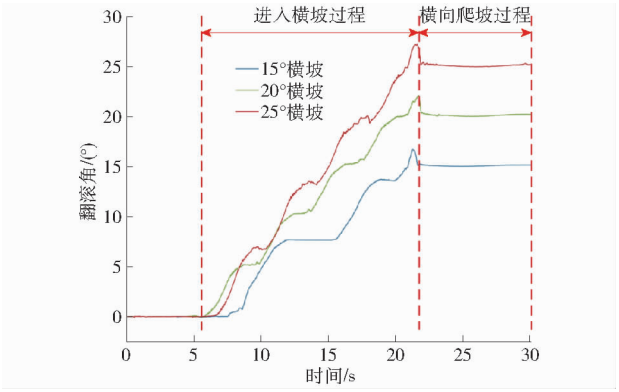


图 18 横坡行驶稳定性仿真结果

Fig. 18 Simulation results of cross-slope driving stability

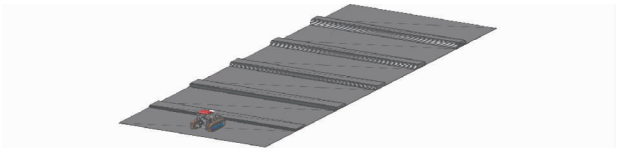


图 19 翻越田埂稳定性仿真

Fig. 19 Simulation of stability over field ridges

的过程中俯仰角从正值逐渐降低至负值,最终回到水平路面时俯仰角从负值逐渐上升为 0°并在翻越下一个田埂前保持平稳。整个过程中随着田埂的高度增加,动力底盘的俯仰角变化幅度逐渐增大,在通过 100、150、175、200、250 mm 田埂时的俯仰角峰值分别为 10.14°、14.67°、17.76°、22.49°、31.70°,均小于整机设计的最大倾覆角,证明动力底盘能够稳定翻越高度为 250 mm 的田埂,满足果园作业要求。

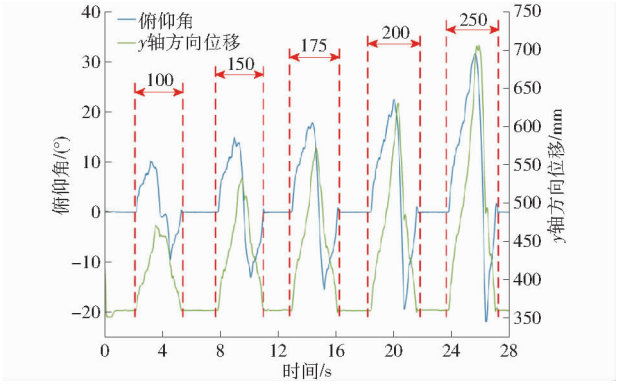


图 20 翻越田埂稳定性仿真结果

Fig. 20 Simulation results of stability over ridge

在 Solidworks 中依次建立宽度为 300、350、400、450、510 mm 的壕沟模型导入 RecurDyn 中,模拟动力底盘跨越不同宽度壕沟的运动情况,如图 21 所示。

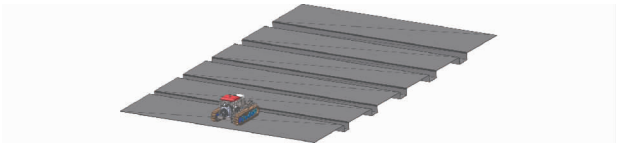


图 21 跨越壕沟稳定性仿真

Fig. 21 Simulation of stability across trenches

仿真结果如图 22 所示，动力底盘在前端进入壕沟时车体产生下俯位移，俯仰角从 0°降为负值，在末端离开壕沟时车体产生上仰复位动作，俯仰角从负值升为正值，通过宽度为 300、350、400、450、510 mm 的壕沟时，动力底盘的俯仰角最大峰值分别为 1.28°、1.72°、1.66°、1.81°、2.07°，均小于整机设计的最大倾覆角，且动力底盘在跨越壕沟的过程中 y 轴方向角速度的最大峰值小于 0.15 rad/s，证明整个行驶过程较为平稳，动力底盘能够稳定跨越宽度为 510 mm 的壕沟，满足果园作业要求。

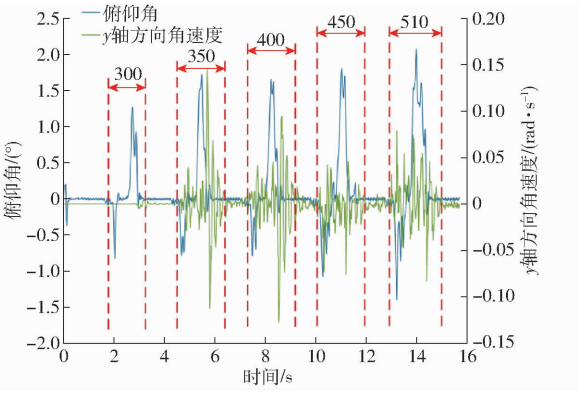


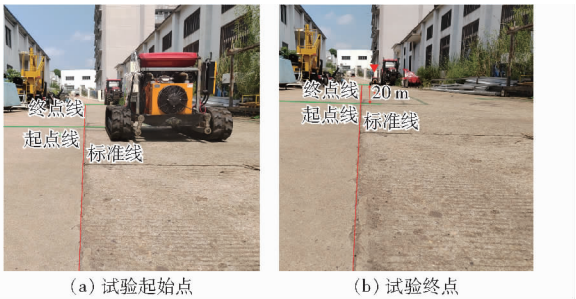
图 22　跨越壕沟稳定性仿真结果

Fig. 22　Simulation results of stability across trenches

4　整机性能试验

4.1　直线行驶偏移率试验

直线行驶偏移率是衡量动力底盘操纵性能的重要指标，若偏移率过高则需操作者频繁进行方向修正导致作业质量下降[16]。因此，本文对动力底盘的直线行驶偏移率进行测试，选择一处硬质平整路面，以驱动轮外侧中心位置作为起始点，不进行方向调整向前行驶 20 m 作为终点，分别测量位于起点和终点时履带外侧与标记线的距离，重复操作测量 5 次，如图 23 所示。



(a) 试验起始点　　(b) 试验终点

图 23　直线行驶偏移率试验

Fig. 23　Straight line travel offset tests

试验结果如表 4 所示，计算得动力底盘直线行驶偏移率平均值为 4.03%，标准误差为 0.24%，采用小样本 t 分布计算其基于 95% 置信水平的置信区间为[3.36%，4.70%]。试验结果小于 6%，符合国家标准[17]。

表 4　直线行驶偏移率试验结果

Tab. 4　Results of straight line driving deviation test

序号	偏移量/mm	偏移率/%
1	701	3.51
2	844	4.22
3	792	3.96
4	971	4.85
5	723	3.61

4.2　最小转弯半径测试

动力底盘转弯性能通过转弯半径进行评价，转弯半径为底盘在极限转向条件下于地面形成的最大圆形车辙轨迹半径[18]。本机具备原地转向功能，所留车辙半径即最小转弯半径。选择一处硬质地面进行最小转弯半径测试试验，原地转向 360°后驶出试验区，在转向圆 120°、240°、360°处用卷尺测量地面其直径并计算其平均值[7]，地面车辙如图 24 所示。最小转弯半径试验结果如表 5 所示，整机最小转弯半径 725.8 mm，满足丘陵果园通过性要求。

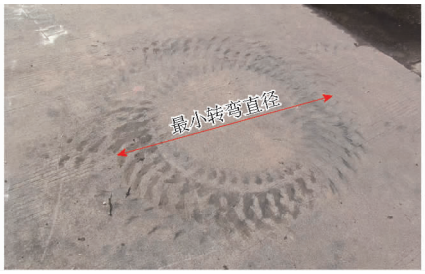


图 24　最小转弯半径试验

Fig. 24　Minimum turning radius test

表 5　最小转弯半径测试结果

Tab. 5　Minimum turning radius test results

转向	测量角/(°)	半径/mm	平均值/mm
左转	120	700	725.7
	240	750	
	360	727	
右转	120	701	726.0
	240	752	
	360	725	

4.3　爬坡试验

为适应丘陵山地果园的典型作业环境，动力底盘需具备较强的坡地适应性。试验选取一处坡度为 16°的干燥硬质路面坡道，遥控无作业机具挂载的底盘，以 0.8 m/s 的速度依次开展纵向前进与倒退上下坡、坡道转弯以及横坡行驶等测试。试验过程中观察底盘在不同工况行驶过程中的姿态变化、行驶平顺性以及稳定性表现。试验场景如图 25 所示，结果表明动力底盘在 16°硬质地面坡道完成上述动作过程中行驶稳定，未发生滑移和剧烈抖动现象。



(a) 纵坡行驶 (b) 横坡行驶

图 25 爬坡试验

Fig. 25 Ascent experiments

4.4 越障试验

在华中农业大学果园全程机械化试验基地随机选取 3 条田埂以及阶梯作为典型障碍物,开展动力底盘的越障性能试验。该基地 150 mm 处土壤紧实度为 0.638 N/mm^2,平均土壤含水量为 12.38%[19]。测量所选田埂高度分别为 255、224、236 mm,宽度分别为 1 940、1 700、1 690 mm,所选阶梯平均高为 150 mm。遥控无作业机具挂载的底盘以 0.8 m/s 的速度翻越田埂和阶梯,观察其行驶稳定性,试验场景如图 26 所示。结果表明,动力底盘均可以顺利通过以上障碍,满足丘陵果园越障行驶要求[10]。



(a) 翻越田埂 (b) 翻越阶梯

图 26 越障试验

Fig. 26 Obstacle crossing tests

4.5 双侧协调摆臂机构可行性试验

在华中农业大学果园全程机械化试验基地选取崎岖路面进行对比试验,选取常规履带底盘作为对照组,试验场景如图 27 所示。将 SCA110T 电压输出单轴倾角传感器固定在两车质心近似位置,设置 VESSTA 9EX 农业机械动力系统多通道数据采集仪的采样频率为 1 024 Hz,采集两车在同一段崎岖路面行驶过程中的俯仰角变化曲线进行对比,以验证双侧协调摆臂机构对复杂路面的适应能力。

采集仪内置现场传感器校准功能,可直接在试验现场对倾角传感器进行标定,采用 FIR 低通与巴特沃斯高通滤波器去除高频噪声和俯仰角积分漂移,输出两机俯仰角变化曲线如图 28 所示。



(a) 常规履带底盘 (b) 双侧协调摆臂履带底盘

图 27 崎岖路面行驶稳定性对比试验

Fig. 27 Comparative test for driving stability on rough roads

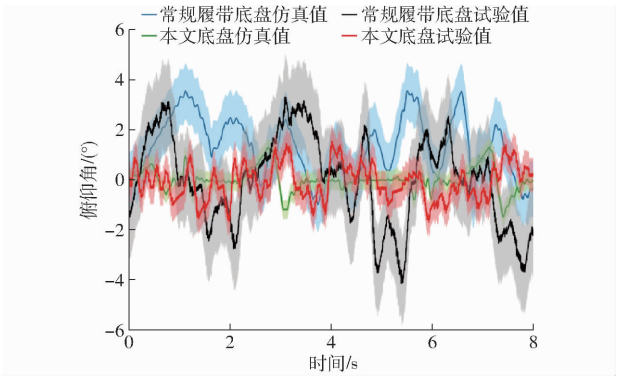


图 28 崎岖路面行驶稳定性对照试验结果

Fig. 28 Comparative test results for driving stability on rough roads

计算对比试验结果与仿真结果中双侧协调摆臂履带底盘与常规履带底盘在行驶过程中的俯仰角变化标准差和标准误差,结果如表 6 所示。

表 6 俯仰角对比试验结果与仿真结果数据分析

Tab. 6 Data analysis of pitch angle comparison test and simulation results (°)

类型	最大值	最小值	标准差	标准误差
本文底盘仿真值	1.336	−1.525	0.371	0.012
常规履带底盘仿真值	3.559	−1.801	1.111	0.035
本文底盘试验值	1.542	−1.679	0.674	0.007
常规履带底盘试验值	3.306	−4.118	1.741	0.019

根据表 6 可知,实际果园崎岖路面较仿真路面模型更为复杂,两种底盘在实地试验中的俯仰角变化标准差均大于仿真结果。底盘在行驶过程中的稳定性可由俯仰角变化的标准差表示,由表 6 数据计算可得,仿真结果中,双侧协调摆臂履带底盘的行驶稳定性较常规履带底盘提升 66.63%;实地试验结果中,其提升率为 61.29%。综上所述,双侧协调摆臂机构能够有效适应丘陵果园复杂地形,提高整机行驶稳定性。

4.6 挂载机构与输出性能试验

动力底盘挂载机构的作用是搭载不同作业机具,同时通过举升横移油缸完成作业机具的提升落地以及左右横移,以达到“一机多用”的目的[20]。遥控动力底盘挂载除草机具进行举升横移测试,如图 29a 所示,结果表明挂载机构举升范围为 −5°~32°,机具左右横移距离均为 100 mm,符合实际需求。

以挂载除草机具为例进行动力底盘输出性能试验,如图 29b 所示。丘陵果园地形复杂,除草作业时底盘速度不宜过快,因此遥控动力底盘以 0.4 m/s



(a)　(b)

图 29　动力底盘功能试验

Fig. 29　Power chassis functional tests

的速度进行除草作业，利用光电式转速表测量除草机具刀轴转速，操纵底盘连续工作 2 h 并记录工作前后液压油温。试验结果如表 7 所示。

表 7　底盘动力输出性能试验结果

Tab. 7　Chassis power output experimental results

参数	数值
刀轴转速/(r·min^{-1})	1 388
除草宽度均值/mm	994
除草前液压油温/℃	20
除草后液压油温/℃	54

试验结果表明，刀轴转速为 1 388 r/min，工作开始前液压油温为 20℃，结束时油温为 54℃，经过 2 h 工作液压油温上升较小，底盘动力输出性能满足丘陵果园农艺作业需求[11]。

5　结论

(1)结合丘陵山地果园种植模式和农艺需求，设计了一款双侧协调摆臂履带式动力底盘，其多体动力学仿真结果表明，该底盘具备良好的地形适应能力，能够实现 25°纵、横向坡地稳定行驶，具备翻越 250 mm 田埂与跨越 510 mm 壕沟的通过性能。

(2)试验结果表明，底盘直线行驶偏移率为 4.03%，最小转弯半径为 725.8 mm，在 16°坡地及越障工况下运行平稳，无明显滑移。与常规履带底盘相比，其崎岖路面行驶稳定性提升 61.29%。挂载机构具备 -5°至 32°的举升范围及 100 mm 横移能力，挂载除草机具作业动力输出稳定，液压系统热特性良好，能够满足丘陵果园多工况作业需求。

(3)该底盘在丘陵果园复杂地形下表现出良好的适应性，双侧协调摆臂机构可有效减小地形起伏引起的姿态波动，提升作业稳定性，且结构简单、维护便捷。其具有较高的通用性与可扩展性。

参　考　文　献

[1] 张开兴，张斓，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)

[2] 张留洋，陈黎卿，朱海婷，等. 农业机械元宇宙技术应用进展[J]. 农业机械学报，2025，56(9)：278 - 290.
ZHANG Liuyang, CHEN Liqing, ZHU Haiting, et al. Exploration of metaverse technology applications in agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 278 - 290. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 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)

[5] 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)

[6] 高巧明，潘栋，张星，等. 全履带模块化无人农用动力底盘设计与仿真[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 2)：561 - 570.
GAO Qiaoming, PAN Dong, ZHANG Xing, et al. Design and simulation of entire track modular unmanned agricultural power chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 561 - 570. (in Chinese)

[7] 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)

[8] GRIGORE L Ş, ONCIOIU I, PRIESCU I, et al. Development and evaluation of the traction characteristics of a crawler EOD robot[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 3757.

[9] 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)

[10] 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 Fa'an, 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)

[11] 张兆国,王媛,温博,等. 自走式三七联合收获机设计与行驶通过性试验[J]. 农业机械学报,2024,55(11):306 - 319.
ZHANG Zhaoguo, WANG Yuan, WEN Bo, et al. Design and trafficability experiment of self-propelled *Panax notoginseng* combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 306 - 319. (in Chinese)

[12] 陈辉龙. 丘陵山地果园履带动力平台设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2024.
CHEN Huilong. Design and test of crawler power platform for hilly and mountainous orchards[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[13] 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. Trafficability analysis of improved forest fire engine based on crawler chassis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 61 - 67. (in Chinese)

[14] 张鑫. 果园全液压履带式遥控动力底盘的设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022
ZHANG Xin. Design and test of full hydraulic crawler type remote control power chassis in orchards[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[15] 潘冠廷,杨福增,孙景彬,等. 小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(9):374 - 383.
PAN Guanting, YANG Fuzeng, SUN Jingbin, et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 374 - 383. (in Chinese)

[16] 王元杰,刘永成,杨福增,等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(22):23 - 29.
WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controll edelectric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 23 - 29. (in Chinese)

[17] 王鹏飞,伊家安,朱建锡,等. 丘陵山地果园动力底盘液压系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(6):702 - 711,722.
WANG Pengfei, YI Jiaan, ZHU Jianxi, et al. Design and test of hydraulic system of power chassis for hilly and mountainous orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 702 - 711, 722. (in Chinese)

[18] 万星宇,舒彩霞,廖庆喜,等. 高地隙履带自走式中间条铺油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):109 - 121.
WAN Xingyu, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of self-propelled middle-placement rape windrower with high ground clearance crawler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 109 - 121. (in Chinese)

[19] 李善军,彭际博,牛成强,等. 丘陵果园铰接转向仿形增程轮式动力底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(9):363 - 376.
LI Shanjun, PENG Jibo, NIU Chengqiang, et al. Design and test of articulated steering profiling extended range wheeled power chassis for hilly orchards[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 363 - 376. (in Chinese)

[20] 康艳,廖庆喜,林建新,等. 联合收获机与油菜直播机连接导轨式悬挂装置研究[J]. 农业机械学报,2024,55(7):111 - 123.
KANG Yan, LIAO Qingxi, LIN Jianxin, et al. Development of guide rail hitch device connecting combine harvester and rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 111 - 123. (in Chinese)