doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.067

拱腰式农业机器人移动底盘设计与通过性研究

聂建军[1]　夏孔涛[1]　解晓琳[2]　吕亚磊[3]　李才敏[1]

(1.中原工学院智能机电工程学院,郑州 451191;2.河南科技大学农业装备工程学院,洛阳 471000;
3.河南中平电新能源投资有限公司,平顶山 467000)

摘要:针对丘陵山区地形多样且复杂的耕种环境,设计了一种可调整履带姿态的拱腰式农业机器人移动底盘。该机器人通过调整履带牵引装置的姿态,增大履带与路面之间的接触比压,提升非结构化地形的通过性能。首先,阐述了机器人移动底盘结构、传动系统及履带牵引装置的设计。其次,研究了履带姿态对机器人底盘通过性能的影响,利用解析法分析了履带抬升、拱起角度与蜗轮蜗杆减速器输出轴旋转角度之间的关系,得到了履带最大抬升角和拱起角为 22.87°、20.13°。再次,分析了机器人底盘的通过性能,利用机器人质心与履带姿态变化的规律,得到了履带姿态与越障高度的关系,通过 Matlab 计算出机器人最大越障高度为 232.85 mm。最后,利用 Adams 软件及样机对机器人的履带抬升、拱腰动作进行运动仿真,得到了履带姿态与摇杆角度之间的关系;通过爬坡、转向试验,得到了机器人能在负载 150 kg 的条件下爬 30°坡,最小转弯半径 805 mm。试验表明,所设计的机器人底盘在调整姿态后,提高了机器人的通过性能,能够很好地适应复杂的丘陵山地环境。

关键词:农业机器人;移动底盘;姿态调整;越障性能;Adams

中图分类号:TP242.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0736-10　　**OSID**:

Mobile Chassis Design and Passability of Arched Waist Agricultural Robot

NIE Jianjun[1]　XIA Kongtao[1]　XIE Xiaolin[2]　LÜ Yalei[3]　LI Caimin[1]

(1. *School of Intelligent Mechatronics Engineering*, *Zhongyuan University of Technology*, *Zhengzhou* 451191, *China*
2. *College of Agricultural Equipment Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471000, *China*
3. *Henan Zhongpingdian New Energy Investment Co.*, *Ltd.*, *Pingdingshan* 467000, *China*)

Abstract: In view of the diverse and complex farming environment in hilly and mountainous areas, traditional machinery is difficult to adapt to the harsh farming environment, a mobile chassis of an arch waist agricultural robot with adjustable track posture was designed. By adjusting the posture of the track traction device, the robot increased the contact pressure between the track and the road surface, and improved the passing performance of the unstructured terrain. Firstly, the structure of robot mobile chassis, design of transmission system and track traction device were described in detail, the relationship between the track lifting, arching angle and the rotation angle of the output shaft of the worm gear reducer was analyzed by analytical method, the maximum lifting angle and arching angle of the track were 22.87° and 20.13°, respectively. Secondly, the passing performance of the robot chassis was analyzed, using the law of robot centroid and track attitude change, the relationship between track attitude and obstacle height was obtained, the maximum obstacle height of the robot was 232.85 mm by Matlab calculation. Through climbing and steering tests, it was obtained that the robot can climb a 30° slope with a minimum turning radius of 805 mm under a load of 150 kg. At the same time, Adams software was used to simulate the robot's track lifting and arching action, the relationship between the crawler attitude and the rocker angle was obtained. Finally, the reliability of the theoretical analysis was verified by the prototype test. The experiment showed that the designed robot chassis can improve the passing performance of the robot after adjusting the attitude, with a variety of agricultural tools, it can be well adapted to the complex hilly and mountainous farming environment, which provided a favorable reference for the development of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas.

Key words: agricultural robot; mobile chassis; posture adjustment; obstacle performance; Adams

收稿日期:2024-06-16　修回日期:2024-07-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2001300)

作者简介:聂建军(1971—),男,副教授,博士,主要从事机械产品现代设计理论及方法和现代制造技术研究,E-mail:jjnie311@163.com

0　引言

我国的丘陵山区耕地具有多斜坡、不规则、多梯田等特征[1-3]，只适合小微型农机作业，而传统的小微型农机作业时存在安全性差、劳动强度高、工作效率低等问题[4-6]。针对上述问题，国内外学者对丘陵山地农用机械底盘做了一些研究。潘冠廷等[7]设计了一款小型山地履带拖拉机，并通过仿真及试验验证了拖拉机的通过性能。王法安等[8]设计了一款马铃薯自走式收获机底盘，该底盘纵、横向最大爬坡角度 28°、20°，最大越障高度和越壕沟宽度分别为 150、300 mm。徐圣林等[9]设计了一种收集农作物信息的独立四驱机器人底盘，该机器人可在横向 28°、纵向 34°的坡上作业。韩振浩等[10]优化了一款山地果园履带底盘，该底盘优化后的最大越障高度可达 230 mm。张兆国等[11]设计了一种三七收获机底盘，该底盘能爬 30°纵坡、20°横坡、300 mm 田埂。王德成等[12]设计了一款履带自走式王草收获机专用底盘，该底盘的最小转弯半径 1 349 mm，最大爬坡度 26°。BAI 等[13]设计了一种自适应横向变形机器人，该结构提高了底盘的通过性。BAO 等[14]研究了一种轻型自走式山地果园通用移动平台，对移动平台进行运动学和动力学建模，实现预期的轨迹自主行走功能。YOUHYUN 等[15]设计了一种用于管道巡检的四足机器人，通过比较步态参考和脚部接触状态来切换步态模式，提高机器人的稳定行走能力。BRUZZONE 等[16]设计了一种轮履混合式移动机器人，该机器人在常规路面采用轮式驱动，不规则路面采用履带驱动，提高了机器人的通过性能。KARAMIPOUR 等[17]设计了一款可调整横、纵向结构越过障碍物的移动机器人，降低了机器人躲避障的能耗、减少了路径规划。针对山区小型农机的研究，大多处于理论分析和模型研究阶段，缺乏对实际复杂地形的适应性验证，因此开展农业机器人的通过性试验研究，弥补了理论与实践之间转化的空白，为保证其在丘陵山区作业可靠性提供关键数据支撑。

本团队研发了弓腰式行走底盘[18-19]，该底盘精巧灵活、可适应多地形作业，但由于履带牵引装置采用皮带传动，导致该底盘在作业时传动效率低、不适合高负荷作业。本团队优化了弓腰式移动底盘的传动系统[20-21]，利用传动轴将动力输入给履带驱动轮，提高传动效率，履带抬升机构采用电推杆控制，能精准控制履带动作，由于工作地形的特殊性，路面对履带的冲击极易加速电推杆内部组件的磨损，造成抬升机构的控制精度下降。为满足用户多场景作业的需求，本设计重新优化弓腰式移动底盘，变速箱设有多个挡位和转向电磁阀，用于机器人不同工作模式，履带抬升机构更换为电机控制，即使电机停止，蜗轮蜗杆也能使履带保持设定姿态。

1　底盘整体结构设计

1.1　底盘结构与原理

拱腰式农业机器人底盘结构如图 1 所示，动力传输装置由发动机、离合器、变速箱等组成[22]。动力经变速箱一分为二，一部分通过变速箱将动力传递给动力输出（Power-take-off，PTO）轴，以便驱动机具深耕、开槽、旋耕等，另一部分则用于机器人行走，即变速箱将发动机输出的一部分动力传递给直角转向器，用于后轮及履带的驱动。履带牵引装置由一个外部电机来控制其抬升或拱腰动作，驱动轮与直角换向器相连接，用于实现履带驱动。

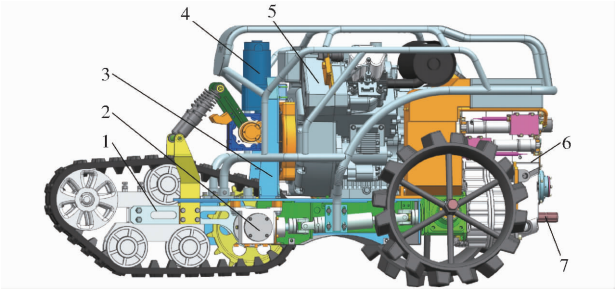


图 1　底盘结构示意图

Fig. 1　Schematic of chassis structure

1. 履带牵引装置　2. 直角换向器　3. 车架　4. 履带抬升电机　5. 发动机　6. 变速箱　7. PTO

1.2　底盘设计参数

拱腰式机器人底盘相关设计参数如表 1 所示。

表 1　底盘相关设计参数

Tab. 1　Chassis related design parameters

参数	数值
整车质量/kg	375
整车尺寸（长 × 宽 × 高）/（mm × mm × mm）	1 650 × 790 × 860
发动机额定功率（转速）/kW（r·min^{-1}）	21（3 600）
最大爬坡度/（°）	30
最小转弯半径/mm	1 200
最小离地间隙/mm	150
最低越障高度/mm	200

1.3　动力传输系统设计

拱腰式农业机器人底盘动力传输系统如图 2 所示，机器人直行时，发动机输出的动力经离合器传递给变速箱，变速箱将动力均匀地传递给履带牵引装置两侧的 T 型直角换向器，两侧的直角换向器带动履带驱动轮内部的差速器锥齿轮 j、j' 同步旋转，由于锥齿轮 k 的中心轴与差速器壳体、驱动轮相互固

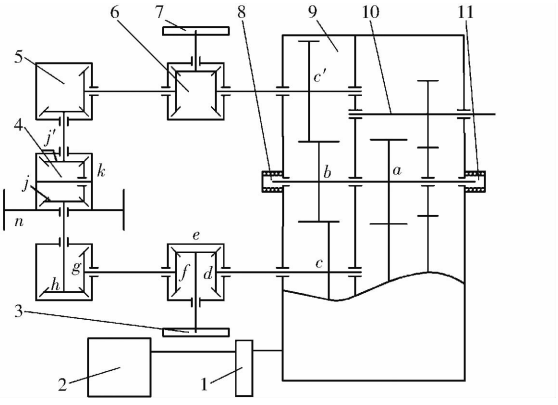


图 2 底盘动力传输路线图

Fig. 2 Chassis power transmission roadmap

1. 离合器 2. 发动机 3. 左后轮 4. 履带驱动轮 5. 直角换向器 6. T 型直角换向器 7. 右后轮 8. 左转电磁阀 9. 变速箱 10. PTO 轴 11. 右转电磁阀

定,锥齿轮 k 绕锥齿轮 j、j'中心轴旋转,进而带动履带驱动轮旋转;机器人右转时,右转电磁阀通电,齿轮 a、b 所在的轴向后移动,齿轮 b 与齿轮 c'脱开,同时锁止机构将齿轮 c'所在的轴锁死,右后轮抱死,右侧传动路线上无动力传输,变速箱内的动力经齿轮 b 传递给锥齿轮 d,锥齿轮 d 将动力输出给左后轮及锥齿轮 f,后经过直角换向器将动力传递给锥齿轮 j,由于锥齿轮 j'无动力输入,所以锥齿轮 k 绕其中心轴自转的同时,还绕锥齿轮 j 的中心轴旋转,进而带动履带驱动轮旋转,左转同理。转向时单边制动,履带速度降为原来的一半,即使一侧制动,履带也能正常工作。

1.4 履带牵引装置设计

履带牵引装置由驱动轮、差速器、履带、张紧轮、导向轮、支重轮、支撑杆系等组成,蜗轮蜗杆减速器和电机固定在车架上,减速器输出轴与摇杆通过键连接,如图 3 所示。

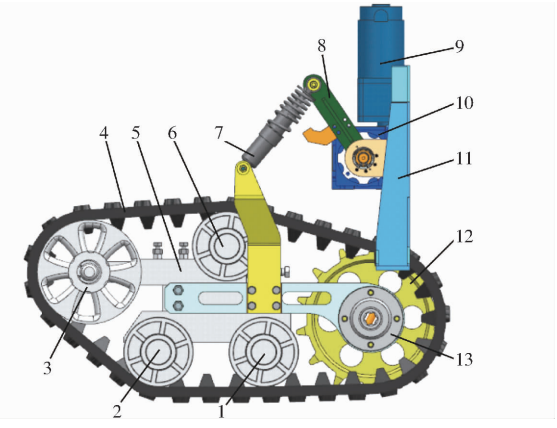


图 3 履带牵引装置组件结构图

Fig. 3 Crawler traction device component structure diagram

1、2. 支重轮 3. 导向轮 4. 履带 5. 支撑杆系 6. 张紧轮 7. 减震器 8. 摇杆 9. 履带抬升电机 10. 蜗轮蜗杆减速器 11. 车架 12. 驱动轮 13. 差速器

当机器人在水平路面上工作时,履带在电机的作用下与路面保持水平,最大程度保证履带与地面的接触面积;在颠簸路面行驶时,减震器吸收路面颠簸带来的震动,减缓对车辆的冲击;在阶梯路面上行驶时,蜗轮蜗杆减速器将履带电机的动力传递给摇杆,摇杆带着减震器、支撑杆系等抬起,继续行驶到履带与阶梯接触,调整履带抬升位置,增大履带与阶梯路面的接触比,充分发挥履带的牵引能力;在陡坡路面上行驶时,抬升或拱起履带,增大履带与地面的接触,履带电机停止工作,蜗轮蜗杆减速器靠自身的自锁功能,将履带保持在工作位置,使机器人持续在陡坡路面上行驶。

考虑该机器人各种工况需求,采用齿轮式橡胶履带。履带的选用既需满足既定的刚度和强度,又需满足接地比压的需求[23],其关系式为

$$L = B/\lambda \tag{1}$$

$$[p] = \frac{F_m}{LB} \tag{2}$$

式中 λ——比例系数

L——履带接地长度

B——履带宽度

$[p]$——允许的接地比压

F_m——单条履带垂直载荷

履带驱动轮的位置极大影响履带接地长度和整机质心位置,驱动轮中心到地面的高为 156 mm,齿数选取 14,由文献[24]中的公式计算可得驱动轮分度圆直径为 260 mm、张紧轮直径为 134 mm、支重轮直径为 134 mm,履带牵引装置参数如表 2 所示。

表 2 履带牵引装置参数

Tab. 2 Parameters of track traction device mm

参数	数值	参数	数值
履带宽度	150	张紧轮半径	67
驱动轮分度圆直径	260	摇杆长度	170
支重轮半径	67	减震器长度	210
导向轮半径	100	履带接地长度	450

2 底盘通过性能理论分析

2.1 履带姿态分析

拱腰式机器人共有 3 种行驶姿态,即履带保持水平、抬升以及拱腰姿态。拱腰式底盘在水平路面行驶姿态示意图如图 4 所示。

(1)履带抬升分析

由图 4 可知,履带支重轮 A、驱动轮 B、支撑杆系位置相对固定,可看作三副构件;由于履带驱动轮 A 与直角换向器输出轴同轴,直角换向器、蜗轮蜗杆

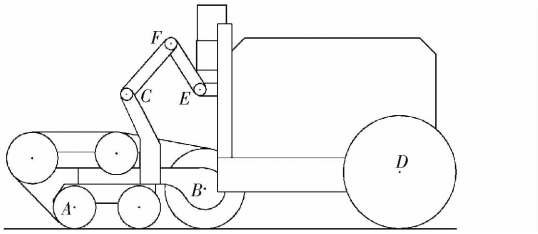


图 4　水平路面行驶姿态示意图

Fig. 4　Horizontal road driving posture diagram

减速器 E 及车轮 D 都固定在车架上，所以履带驱动轮、蜗轮蜗杆减速器、车轮也可看作三副构件。

履带牵引装置在抬升时绕驱动轮轴心进行转动。以履带驱动轮圆心位置为坐标原点建立直角坐标系 xBy，如图 5 所示，此时车辆处于水平路面，履带驱动轮为坐标原点，履带方向为 x 轴正方向，与水平路面垂直向上为 y 轴正方向。其中 A 为支重轮圆心，B 为驱动轮圆心，C 为支撑杆系与减震器连接轴中心，D 为后车轮中心，E 为涡轮蜗杆输出轴的圆心，F 为摇杆与减震器连接轴中心。θ_1 为 BC 与 y 轴之间的夹角；θ 为履带抬升角度，当履带处于水平位置时，θ 为 0°，θ_1 为 39.786 3°，履带抬升 θ 时，θ_1 随之减小 θ；θ_2 为 BE 与 y 轴之间的夹角；θ_3 为 CF 与 x 轴之间的夹角；θ_4 为 EF 与 x 轴之间的夹角，即摇杆转过的角度。其中 BC、BE、CF、EF 的长度分别为 r_1、r_2、r_3、r_4。

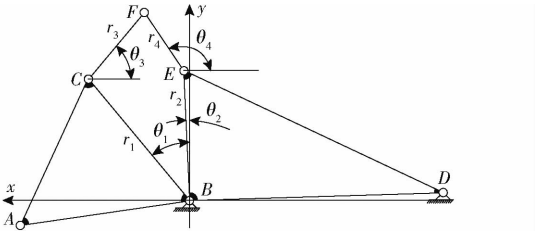


图 5　履带抬升机构简图

Fig. 5　Crawler lifting mechanism diagram

在坐标系 xBy 中，各杆向 x、y 轴上投影可得

$$\begin{cases} r_3\cos\theta_3 = r_1\sin\theta_1 + r_4\cos\theta_4 - r_2\sin\theta_2 \\ r_3\sin\theta_3 = r_2\cos\theta_2 - r_1\cos\theta_1 + r_4\sin\theta_4 \end{cases} \tag{3}$$

式(3)两端平方后相加，整理可得

$$r_3^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_4^2 - 2r_1r_2\cos(\theta_1 - \theta_2) + 2r_1r_4\sin(\theta_1 - \theta_4) + 2r_2r_4\cos(\theta_4 - \theta_2) \tag{4}$$

B、C、E 坐标分别为(0,0) mm、(221,258) mm、(14,313) mm，且 r_3 为 210 mm，r_4 为 170 mm，在摇杆 EF 逆时针转动过程中，B、E 位置始终固定不变，θ_2 为 2.561°。由式(4)可得，已知履带抬升角度 θ，即求解对应的摇杆摆动角度 θ_4。

(2)履带拱腰分析

在拱腰阶段，履带牵引装置受摇杆推力的作用绕支重轮圆心 A 转动，当摇杆 EF 与减震器 CF 共线时，履带拱起到最大角度。以履带支重轮圆心位置为坐标原点建立直角坐标系 xAy，如图 6 所示，履带前进方向为 x 轴负方向，以履带支重轮 A 为中心，逆时针转过的角度与 x 轴之间的夹角为正。分别连接 AD、CD、CE，θ_1、θ_2、θ_3、θ_4、θ_5、θ_6、θ_{d1}、θ_{d2}、θ_{d3} 分别为 AB、BE、DE、AD、AC、CF、BD、CD、CE 与 x 轴之间的夹角，θ_7 为 EF 与 y 轴之间的夹角，AB 与 AC 之间的夹角 δ 为 90.683 2°，当履带处于水平位置时，θ 为 0°，θ_1 为 8.248 3°，履带拱起 θ 时，θ_1 随之增加 θ。AB、BE、DE、AD、AC、CF、EF、BD、CD、CE 的向量分别为 r_1、r_2、r_3、r_4、r_5、r_6、r_7、r_{d1}、r_{d2}、r_{d3}，车轮中心 D 到 x 轴长度为 r。

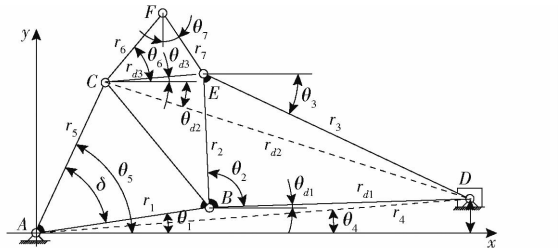


图 6　履带拱腰机构简图

Fig. 6　Brief drawing of crawler arch waist mechanism

在三角形 ABD 中，各边向 x、y 轴上投影可得

$$\begin{cases} r_1\cos\theta_1 + r_{d1}\cos\theta_{d1} = r_4\cos\theta_4 \\ r_1\sin\theta_1 + r_{d1}\sin\theta_{d1} = r_4\sin\theta_4 \\ r_4\sin\theta_4 = r \end{cases} \tag{5}$$

式中，θ_{d1}、θ_4、r_4 为未知数，两边平方后可得

$$\begin{cases} \theta_{d1} = \arcsin\dfrac{r - r_1\sin\theta_1}{r_{d1}} \\ r_4 = \sqrt{r^2 + \left[r_1\cos\theta_1 + \sqrt{r_{d1}^2 - (r - r_1\sin\theta_1)^2}\right]^2} \\ \theta_4 = \arcsin\dfrac{r}{r_4} \end{cases} \tag{6}$$

在求得 θ_{d1} 后，由向量三角形 BDE 可以得到向量方程

$$r_3 e^{i\theta_3} = r_{d1} e^{i\theta_{d1}} + r_2 e^{i\theta_2} \tag{7}$$

式中，θ_3、r_3 为未知数，θ_2 为 BE、BD 之间的夹角与 θ_{d1} 的和，等式两边分别乘其共轭复数可得

$$\begin{cases} r_3 = \sqrt{r_{d1}^2 + r_2^2 - 2r_{d1}r_2\cos(\theta_2 + \theta_{d1})} \\ \theta_3 = \arctan\dfrac{r_2\sin\theta_2 + r_{d1}\sin\theta_{d1}}{r_{d1}\cos\theta_{d1} - r_2\cos\theta_2} \end{cases} \tag{8}$$

在求得 θ_4、r_4 后，由向量三角形 ACD 可以得到向量方程

$$r_{d2} e^{i\theta_{d2}} = r_4 e^{i\theta_4} - r_5 e^{i\theta_5} \tag{9}$$

式中，θ_{d2}、r_{d2} 为未知数，$\theta_5 = \delta + \theta_1$，等式两边分别乘其共轭复数可得

$$\begin{cases} r_{d2} = \sqrt{r_4^2 + r_5^2 - 2r_4 r_5 \cos(\theta_5 - \theta_4)} \\ \theta_{d2} = \arctan \dfrac{r_5 \sin\theta_5 - r_4 \sin\theta_4}{r_4 \cos\theta_4 - r_5 \cos\theta_5} \end{cases} \tag{10}$$

在求得 θ_3、θ_{d2}、r_{d2}后，由向量三角形 CDE 可以得到向量方程

$$r_{d3} e^{i\theta_{d3}} = r_{d2} e^{i\theta_{d2}} - r_3 e^{i\theta_3} \tag{11}$$

式中，θ_{d3}、r_{d3}为未知数，等式两边分别乘其共轭复数求解可得

$$\begin{cases} r_{d3} = \sqrt{r_{d2}^2 + r_3^2 - 2r_{d2} r_3 \cos(\theta_{d2} - \theta_3)} \\ \theta_{d3} = \arctan \dfrac{r_3 \sin\theta_3 - r_{d2} \sin\theta_{d2}}{r_{d2} \cos\theta_{d2} - r_3 \cos\theta_3} \end{cases} \tag{12}$$

在求得 θ_{d3}、r_{d3}后，由向量三角形 CEF 可以得到向量方程

$$r_6 e^{i\theta_6} = r_{d3} e^{i\theta_{d3}} - r_7 e^{i\theta_7} \tag{13}$$

式中，θ_6、θ_7为未知数，由式(13)计算可得

$$\theta_7 = \theta_{d3} - \arcsin \frac{r_6^2 - r_{d3}^2 - r_7^2}{2r_{d3} r_7} \tag{14}$$

图 6 中，点 A、B、C、D、E 坐标分别为(0,0) mm、(407,59) mm、(186,317) mm、(1 017,79) mm、(393,372) mm，r_6为 210 mm，r_7为 170 mm，BD、BE 之间的夹角为 90.683 2°。由式(14)推导可知，已知履带拱起角度 θ，即可求得对应的摇杆摆动角度 θ_7。

2.2 底盘质心随履带姿态变化规律

底盘在运动过程中，整车质心位置随履带姿态的变化而变化。以后轮与地面接触点 O 为坐标原点建立直角坐标系 xOy，履带前进方向为 x 轴的正方向，如图 7 所示。

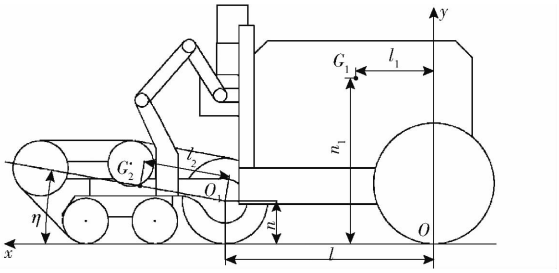


图 7 机器人质心位置示意图

Fig. 7 Robot center of mass position diagram

由质心坐标公式可推算出拱腰机器人的质心坐标 $V(V_x, V_y)$为[25-26]

$$\begin{cases} V_x = \dfrac{m_1 l_1 + m_2(l - l_1) + m_2 l_2 \cos\eta}{m_1 + m_2} \\ V_y = \dfrac{m_1 n_1 + m_2 n + m_2 l_2 \sin\eta}{m_1 + m_2} \end{cases} \tag{15}$$

式中 m_1——车体质量

l——履带驱动轮圆心到 y 轴距离

l_1——车体质心到 y 轴距离

l_2——履带质心与驱动轮圆心之间距离

m_2——履带牵引装置质量

n——驱动轮圆心到 x 轴的距离

η——履带质心和驱动轮轴心连线与 x 轴的夹角

将机器人整体质量 $m = m_1 + m_2$与式(15)结合得

$$\left(V_x - \frac{m_1 l_1 + m_2 l - m_2 l_1}{m}\right)^2 + \left(V_y - \frac{m_1 n_1 + m_2 n}{m}\right)^2 = \left(\frac{m_2 l_2}{m}\right)^2 \tag{16}$$

由式(16)可得：当履带进行抬升或拱腰时，机器人的质心在以$((m_1 l_1 + m_2 l - m_2 l_1)/m, (m_1 n_1 + m_2 n)/m)$为圆心，$m_2 l_2/m$ 为半径的圆上运动。

2.3 底盘越障分析

拱腰式农业机器人翻越阶梯路面时，共分为 4 个阶段，如图 8 所示。图 8a 为准备阶段：机器人即将行驶到台阶障碍时，抬升履带，继续行驶至履带与台阶接触；图 8b 为越障阶段：机器人继续前行，整个履带越上台阶障碍物；图 8c 为拱腰阶段：履带越上障碍物后，控制履带向下拱腰，车体底盘底面与地面的夹角随底盘拱起而增大，机器人前行，当车体底盘底面与台阶发生接触时，达到越障极限；图 8d 为越障完成阶段：后轮爬上台阶，完成越障。

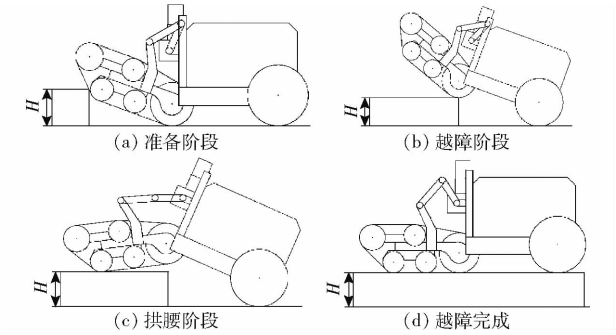


图 8 履带底盘越障过程

Fig. 8 Crawler chassis obstacle surmounting process

由履带底盘越障过程可知，机器人在拱腰阶段时，底盘的重力线正好通过台阶的外角线时，机器人处于侧翻临界位置，此时达到最大越障高度[27-28]，如图 9 所示。

根据图 9 中的几何关系计算得最大越障高度为

$$H(\theta, \gamma) = s[V_x \sin\gamma + V_y \cos\gamma - (V_y - t)/\cos\gamma] \tag{17}$$

式中 s——越障系数

γ——机器人底盘仰起角度

t——车体最小离地间隙

将式(15)、(17)导入 Matlab 进行结果分析，如图 10 所示。在理想条件下，当履带拱起到最大极限时，机器人所能通过的最大越障高度为 232.85 mm，此时

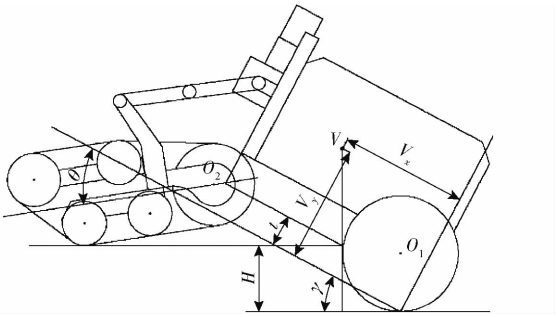


图 9　越障极限示意图

Fig. 9　Obstacle limit diagram

履带拱起角 θ 与底盘仰起角 γ 分别为 $-20°$、$39.98°$。

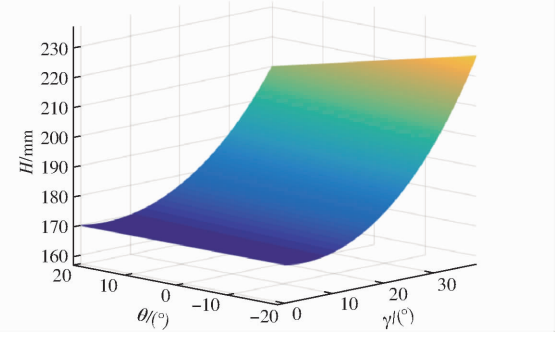


图 10　底盘姿态与越障高度分析图

Fig. 10　Chassis attitude and obstacle height analysis diagram

2.4　纵向坡度稳定性分析

（1）上坡极限分析

机器人上坡受力分析如图 11 所示，F_n 为地面对机器人的支撑合力，G 为机器人的重力，O 为后轮与坡面的接触点，h_1 为机器人质心到坡面的距离，a、b 分别为机器人质心及支撑合力 F_n 沿斜坡方向到车轮的距离，β_1 为坡道角度，平衡力矩方程为

$$Ga\cos\beta_1 = F_n b + Gh_1\sin\beta_1 \tag{18}$$

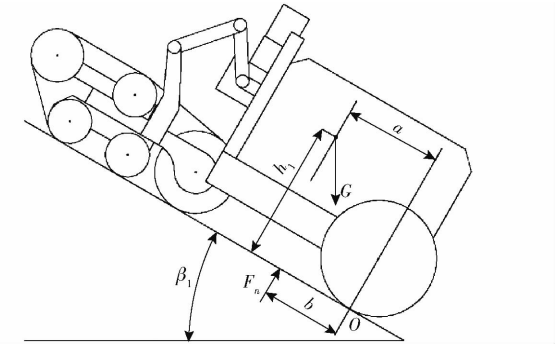


图 11　上坡受力分析

Fig. 11　Uphill force analysis

随着坡道角度的增加，支撑合力不断向 O 处移动，当支撑合力完全作用在车轮 O 上时，机器人达到向后倾覆的临界点，即 $b \geqslant 0$ 时，机器人不会发生纵向倾翻，由式（18）推算可得

$$b = G(a\cos\beta_1 - h_1\sin\beta_1)/F_n \geqslant 0 \tag{19}$$

$$\beta_1 \leqslant \arctan(a/h_1) \tag{20}$$

（2）下坡极限分析

机器人下坡受力分析如图 12 所示，O_2、O_3 分别为后轮、履带最前端与坡面的接触点，h_2 为机器人质心到坡面的距离，β_2 为坡道角度，x 为 O_2 与 O_3 的距离，平衡力矩方程式为

$$G(x-a)\cos\beta_2 = F_n(x-b) + Gh_2\sin\beta_2 \tag{21}$$

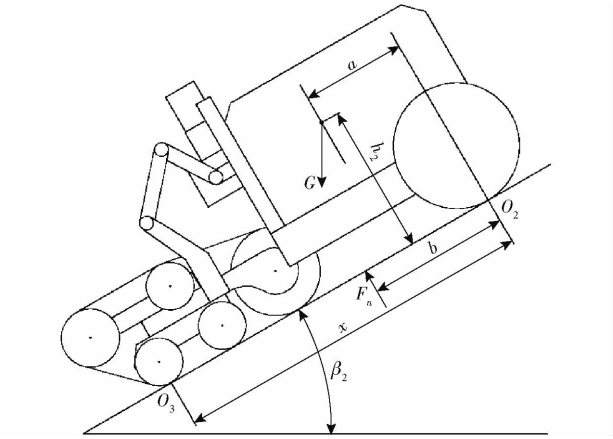


图 12　下坡受力分析

Fig. 12　Downhill force analysis

随着下坡角度的增加，支撑合力不断向 O_3 处移动，当支撑合力完全作用在车轮 O_3 上时，机器人达到向后倾覆的临界点，即 $x - b \geqslant 0$ 时，机器人不会发生纵向倾翻，由式（21）推算可得

$$x - b = G[(x-a)\cos\beta_2 - h_2\sin\beta_2]/F_n \tag{22}$$

$$\beta_2 \leqslant \arctan\frac{x-a}{h_2} \tag{23}$$

（3）纵向滑移分析

随着坡道角度的增大，路面的摩擦力难以支撑机器人静止在斜坡上时，将出现滑移现象，因此对机器人在此状态下进行受力分析，机器人不产生滑移条件为

$$\psi F_t = \psi G\cos\omega \geqslant G\sin\omega \tag{24}$$

式中　F_t——机器人受到的制动力

ψ——地面附着系数

ω——极限滑移角

由式（24）可知，机器人最大纵向滑移角为

$$\omega_{\max} = \arctan\psi \tag{25}$$

2.5　横向坡度稳定性分析

（1）横向极限倾翻分析

机器人横向斜坡受力分析如图 13 所示，φ 为横坡角度，O_1、O_2 分别为地面与机器人左后轮、履带左边沿接触点，F_{n1}、F_{n2} 分别为地面对左后轮、履带左边沿的支撑力，h_1 为机器人质心到坡面的距离，B 为履带宽度，c 为 O_1 与 O_2 之间的距离，e 为履带中心到

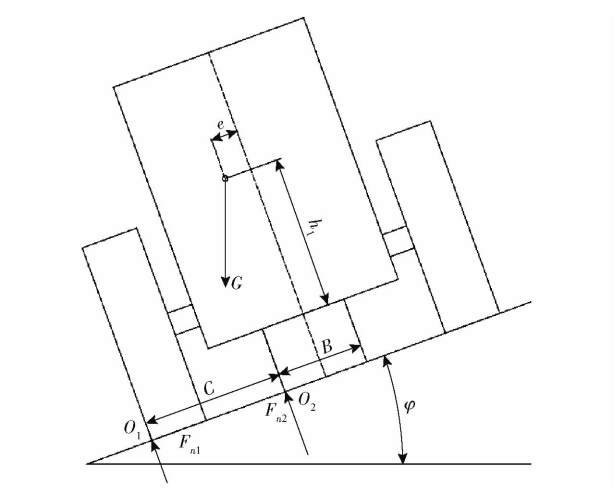


图 13 横坡受力分析

Fig. 13 Force analysis of transverse slope

质心 G 的偏心距,平衡力矩方程式为

$$Gh_1\sin\varphi = G(B/2 + c - e)\cos\varphi + F_{n2}c \tag{26}$$

受力分析可得,当 $F_{n2} \geqslant 0$ 时,机器人不会发生侧翻,即

$$\varphi \leqslant \arctan\frac{B + 2c - 2e}{2h} \tag{27}$$

(2)横向滑移分析

随着横坡角度的增大,机器人在横坡上将出现滑移现象,对机器人进行受力分析得

$$\psi_1 F_{n1}\cos\varepsilon + \psi_2 F_{n2}\cos\varepsilon = G\sin\varepsilon \tag{28}$$

式中 ψ_1、ψ_2——地面附着系数

ε——横向极限滑移角

ψ_1、ψ_2取最小值整理可得

$$\psi_{\min}\cos\varepsilon(F_{n1} + F_{n2}) = \psi_{\min} G\cos\varepsilon \tag{29}$$

$\psi_{\min}$为 φ_1 最小值与 φ_2 最小值的和。

由式(28)、(29)可得,横坡极限滑移角为 $\arctan\psi_{\min}$。

2.6 转向性能分析

该底盘利用转向电磁阀中断转向侧动力的输出,同时锁止机构抱死转向侧动力轴,单边制动,形成转向力矩,实现差速转向。

构建如图 14 所示机器人转向示意图,O 为转向中心,O'为后桥中心,O_1、O_2、O_3分别为左后轮、右后轮及履带的几何中心,ω_T为转向角速度,R 为转向半径,S 为后轴轮距。

驱动轮几何中心的速度分别为

$$\begin{cases} v_L = v\dfrac{R + 0.5S}{R} \\ v_R = v\dfrac{R - 0.5S}{R} \end{cases} \tag{30}$$

式中 v、v_L、v_R——O'、O_1、O_2处的速度

当转向内侧车轮完全抱死时,车轮转速为 0,即 v_R = 0,此时最小转向半径为后轴轮距。

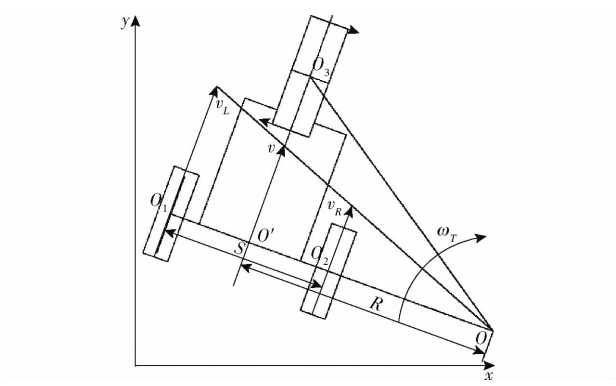


图 14 机器人转向示意图

Fig. 14 Robot steering diagram

3 拱腰式农业机器人结构分析与仿真

利用 Adams 软件对拱腰式机器人的履带抬升、拱腰动作进行运动仿真,整个底盘可分为履带牵引装置、车身及履带抬升装置。在建模过程中,履带牵引装置和车身可简化为 2 个三副构件,履带抬升装置中的摇杆和减震器可简化为 2 个连杆,机器人抬升时,驱动轮圆心和后车轮中心可视为固定铰链,如图 15a 所示:机器人拱腰时,支重轮圆心可视为固定铰链,后车轮中心可视为固定滑块,如图 15b 所示。

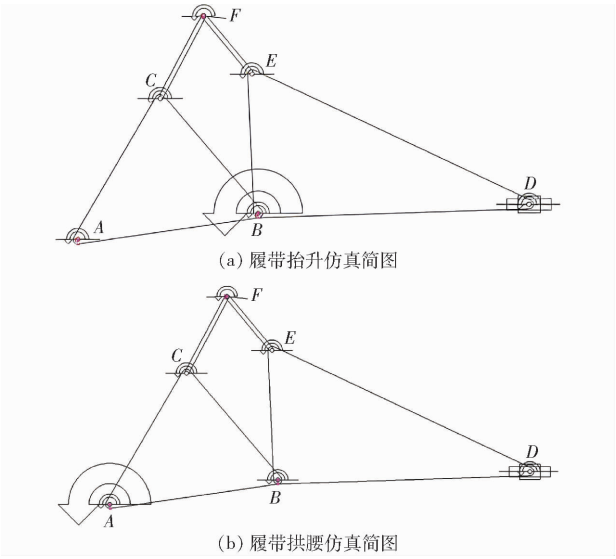
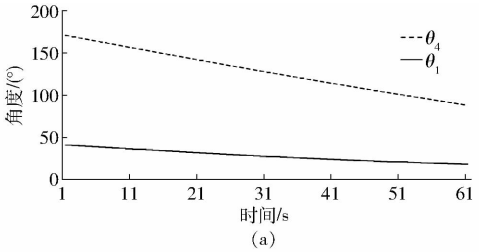


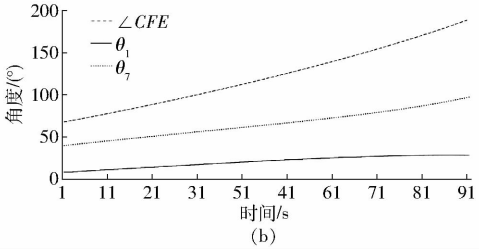
图 15 履带运动机构仿真简图

Fig. 15 Tracked motion mechanism simulation diagrams

由运动仿真结果可知,履带从水平位置抬升到极限位置时,θ_1由 40.583°抬升到 17.709 6°,摇杆摆动角 θ_4顺时针旋转了 60°;履带在拱腰阶段时,当摇杆 EF 与减震器 CF 夹角为 180°时,履带处于最大拱腰极限,此时 θ_1由 8.248 3°拱起到 28.383 3°,同时摇杆摆动角 θ_7逆时针旋转 52.042°,如图 16 所示。



(a)



(b)

图 16　履带姿态与摇杆摆角分析图

Fig. 16　Track posture and rocker swing angle analysis diagrams

4　拱腰式机器人通过性能试验

4.1　越障性能试验

拱腰式机器人越障性能试验如图 17 所示。试验结果表明：机器人在越障过程中表现良好，动力强劲，通过试验测得履带在抬升时，抬升角度为 22.5°，相对误差为 1.632%；履带拱腰时，拱起角度为 20.5°，相对误差为 1.812%；拱腰机器人在实际测量过程中翻越的极限高度为 224.3 mm，通过 Matlab 编程计算出的最大越障高度为 232.85 mm，相对误差为 3.67%。由于水泥路面与田间土路之间的附着系数不同，机器人翻越阶梯路面的能力也略微不同。上述结论均在水泥路面试验获得。



(a) 准备阶段



(b) 拱腰越障阶段

图 17　越障性能试验

Fig. 17　Obstacle crossing performance tests

4.2　爬坡性能试验

为验证底盘适应多场景作业的需求，采用低速挡对拱腰式机器人进行空载和负载 150 kg 时上、下 30°坡试验，如图 18 所示。一般将机器人停放到坡道边缘，以低速挡平稳爬坡，机器人完全上坡后，平稳停车，观察机器人是否出现滑移现象，最后挂入倒挡下坡。结果表明，机器人在空载和负载 150 kg 的条件下，能够稳定地上、下 30°坡。

4.3　转向性能试验

根据 GB/T 3871.5—2022《转向圆和通过圆直径》进行最小转弯半径测量，整机以低速挡在水泥路面进行转向试验，如图 19 所示。操作转向手柄给转向电磁阀通电，中断转向侧车轮动力输入，同时转向侧车轮被抱死，旋转一周后测量行驶轨迹试验结果如表 3 所示。



(a) 空载



(b) 负载

图 18　爬坡性能试验

Fig. 18　Climbing ability tests

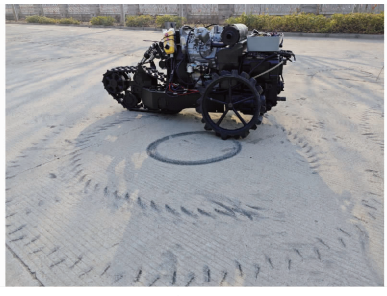


图 19　转向性能试验

Fig. 19　Steering performance test

表 3　最小转弯半径测试结果

Tab. 3　Minimum turning radius test results　mm

转向	序号	直径	平均值	最小转弯半径
左转	1	1 613	1 609	805
	2	1 604		
	3	1 610		
右转	1	1 617	1 611	
	2	1 604		
	3	1 612		

由表 3 试验数据可知，拱腰式机器人最小转弯半径为 805 mm，符合丘陵山区及小块农田作业需求。由于机器人在转向过程中车轮存在抱死拖滑现象，实际测量的最小转向半径(805 mm)大于理论计算结果(790 mm)。

4.4　田间开沟试验

为检验机器人的作业性能，在洛阳市生态采摘园进行开沟试验，如图 20 所示。底盘搭载自研开沟机具，由电推杆控制机具升降。按照果园开沟作业



图 20　开沟试验

Fig. 20　Trenching test

要求,深度 150 mm、宽 300 mm,以中、低速挡连续作业 2 h。

该机器人在开沟作业时,底盘最大开沟深度 220 mm、宽 350 mm。然而,随着开沟深度的增加,机器人后方被机具顶起,轮胎与履带出现打滑现象,给底盘施加配重,机器人仍可继续进行开沟作业。试验表明,该机器人能够满足丘陵山区、果园等地的作业需求。

5 结论

(1)通过对履带牵引装置的姿态与摇杆摆角进行理论分析,得到了履带抬升角度、拱起角度与摇杆摆动角度之间关系,为后续履带牵引装置的控制设计提供理论依据。

(2)通过对履带姿态与车体位置关系进行理论计算,建立履带姿态与质心位置变化之间的关系,得到了拱腰式机器人最大越障高度为 232.85 mm。

(3)通过理论设计计算、Adams 软件仿真及样机试验结果分析可知,履带抬升时,理论计算与试验结果的相对误差为 1.632%;履带拱腰时,理论计算与试验结果的相对误差为 1.812%;理论计算与试验最大越障高度相对误差为 3.67%;机器人在低速挡爬坡、转向时,负载 150 kg 条件下,可稳定上、下 30°坡,实测最小转弯半径为 805 mm。上述相对误差均在合理的设计范围内,说明本文所设计的机器人满足设计需求。

参 考 文 献

[1] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):1-20. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 张经廷,李谦,张峰,等. 丘陵山区旱作节水技术与农业机械化发展现状及趋势[J]. 中国农机化学报,2019,40(6):197-200,226.
ZHANG Jingting,LI Qian,ZHANG Feng,et al. Water-saving techniques in dry farming and trends of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(6):197-200, 226. (in Chinese)

[4] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):1-15. (in Chinese)

[5] 刘成良,贡亮,苑进,等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报,2022,53(7):1-22,55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):1-22,55. (in Chinese)

[6] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(10):1-24.
MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):1-24. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 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):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.):10-19. (in Chinese)

[9] 徐圣林,朱立成,韩振浩,等. 作物表型信息获取机器人底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊):388-399.
XU Shenglin, ZHU Licheng, HAN Zhenhao, et al. Design and experiment of robot chassis for obtaining crop phenotypic information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(Supp.):388-399. (in Chinese)

[10] 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)

[11] 张兆国,邓寓轩,王法安,等. 自走式三七联合收获机底盘通过性能分析与模型试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):164 – 177.
ZHANG Zhaoguo, DENG Yuxuan, WANG Fa'an, et al. Trafficability analysis and scaling model experiment of self-propelled panax notoginseng combine harvester chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):164 – 177. (in Chinese)

[12] 王德成,赵彦瑞,尤泳,等. 履带自走式缓坡地王草收获机底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):178 – 187.
WANG Decheng, ZHAO Yanrui, YOU Yong, et al. Design and experiment of self-propelled tracked chassis of king grass harvester for gentle sloping fields[J]. Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):178 – 187. (in Chinese)

[13] BAI Yidong, SUN Lingyu, ZHANG Minglu. Design and analysis of multistage adaptive lateral deformation tracked robot[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2022,36(1):371 – 383.

[14] BAO Xiulan, MAO Jincheng, DAI Peng, et al. Research on trajectory planning and control system of general mobile platform for mountain orchard[J]. The Journal of Engineering,2022(5):466 – 477.

[15] YOUHYUN J, WOOJIN S, KOOKSUN L, et al. Development of quadruped robot for inspection of underground pipelines in nuclear power plants[J]. Electronics Letters,2021,58(6):234 – 236.

[16] BRUZZONE L, BAGGETTA M, NODEHI S E, et al. Functional design of a hybrid leg-wheel-track ground mobile robot[J]. Machines,2021,9(1):146 – 157.

[17] KARAMIPOUR E, DEHKORDI F S, KORAYEM H M . Reconfigurable mobile robot with adjustable width and length: conceptual design, motion equations and simulation[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems,2020,99(3):1 – 18.

[18] 聂建军,闫修鹏,马宗正,等. 新型弓腰式移动底盘的设计及通过性分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(3):515 – 524.
NIE Jianjun, YAN Xiupeng, MA Zongzheng, et al. Design and trafficability analysis of new bow waist mobile chassis[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2022,52(3):515 – 524. (in Chinese)

[19] 郭家杰. 弓腰式农业机器人设计及关键技术研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2022.
GUO Jiajie. Bow-waisted agricultural robot design and key technology research[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology,2022. (in Chinese)

[20] XIE Xiaolin, HAN Xiaobing, ZHANG Zhihong, et al. Structural design and test of arch waist dynamic chassis for hilly and mountainous areas[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2022,127(3):1921 – 1933.

[21] 吴莹辉. 新型弓腰式移动底盘基础理论与试验分析[D]. 西安:西安理工大学,2023.
WU Yinghui. Basic theory and experimental research of a new type of bow-waist moving chassis[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2023. (in Chinese)

[22] 闫修鹏. 新型弓腰式行走底盘的设计及通过性研究[D]. 郑州:中原工学院,2021.
YAN Xiupeng. Design and passability study of new bow waist walking chassis[D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology,2021. (in Chinese)

[23] WANG Weidong, YAN Zhiyuan, DU Zhijiang. Experimental study of a tracked mobile robot's mobility performance[J]. Journal of Terramechanics,2018,77(6):75 – 84.

[24] 王锋. 丘陵山地果园动力底盘的坡地通过性研究[D]. 重庆:西南大学,2020.
WANG Feng. Study on slope passability of the orchard power chassis in hilly area[D]. Chongqing: Southwest University, 2020. (in Chinese)

[25] 宗成国,刘纪新,于岩,等. 关节式双履带移动机器人越障稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(10):4004 – 4008.
ZONG Chengguo, LIU Jixin, YU Yan, et al. Stability analysis of obstacle-crossing for articulated dual-track mobile robot[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(10):4004 – 4008. (in Chinese)

[26] 刘昌福. 复杂环境下的关节式履带巡检机器人越障性能研究[D]. 衡阳:南华大学,2018.
LIU Changfu. Research on obstacle-crossing performance of articulated crawler inspection robot in complex environment[D]. Hengyang: University of South China,2018. (in Chinese)

[27] 陈继清,黄仁智,莫荣现,等. 基于 RecurDyn 小型绿篱修剪机履带底盘越障性能分析与仿真[J]. 中国农机化学报,2020,41(10): 89 – 98.
CHEN Jiqing, HUANG Renzhi, MO Rongxian, et al. Analysis and simulation of obstacle crossing performance of tracked chassis of small hedge trimmer based on RecurDyn[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(10):89 – 98. (in Chinese)

[28] 罗晗. 履带式机器人底盘设计与运动性能分析[D]. 成都:西南交通大学,2022.
LUO Han. The chassis structure design and kinematics performance analysis of tracked mobile robot[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2022. (in Chinese)