

丘陵山地果园动力底盘液压系统设计与试验

王鹏飞¹ 伊家安¹ 朱建锡² 张印勇³ 杨欣¹

(1. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071001; 2. 金华市农业科学研究院, 金华 321000;
3. 邢台市职业技术教育中心, 邢台 054000)

摘要: 针对丘陵山地果园劳动强度大、生产效率低、机械化程度低等问题, 设计了一种液压控制、机械传动的丘陵山地果园动力底盘。首先对整机的液压控制系统和传动原理进行阐述; 其次根据丘陵山地果园动力底盘的工作需求, 对动力底盘的静液压传动装置(HST)、悬挂提升装置、液压驱动系统等关键部件进行设计和匹配选型, 利用AMESim仿真软件建立液压系统模型, 对液压系统进行结构设计和仿真分析, 确定该系统马达转速为129 r/min, 马达排量为35.2 L/min; 双联泵前泵、后泵排量分别为10 mL/r和6 mL/r, 工作压力为25 MPa。最后进行整机性能试验。整机性能试验结果表明, 动力底盘直线行驶偏移率为1.9%, 满足相应国家标准要求($\leq 6\%$)。整机行走速度为5 km/h, 最小转弯半径1.08 m, 最大爬坡角度 27° , 挂载机具最大提升角 30° , 后悬挂装置响应速度为1 s, 动力底盘转向性能良好, 可适应丘陵山地果园狭窄的坡地作业环境。挂载旋耕机进行旋耕作业时, 耕宽稳定性系数和耕深稳定性系数分别为98.9%和96.4%, 满足国家标准要求($\geq 85\%$)。丘陵山地果园履带式底盘液压控制系统符合山地果园履带拖拉机的设计标准。

关键词: 丘陵山地; 动力底盘; 液压系统; AMESim

中图分类号: S224.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)06-0702-10

OSID:



Design and Test of Hydraulic System of Power Chassis for Hilly and Mountainous Orchards

WANG Pengfei¹ YI Jiaan¹ ZHU Jianxi² ZHANG Yinyong³ YANG Xin¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China
2. Jinhua Academy of Agricultural Sciences, Jinhua 321000, China
3. Xingtai Technician College, Xingtai 054000, China)

Abstract: In order to solve the problems of high labor intensity, low production efficiency and low degree of mechanization in hilly and mountainous orchards, a power chassis for hilly and mountainous orchards with hydraulic control and mechanical transmission was designed. According to the working requirements of the power chassis of the hilly and mountainous orchards, the key components of the power chassis such as hydro static transmission (HST), suspension lifting device and hydraulic drive system were designed and matched, the hydraulic system model was established by using AMESim simulation software, the structural design and simulation analysis of the hydraulic system were carried out, and the motor speed of the system was determined to be 129 r/min and the motor displacement was 35.2 L/min, the displacement of the front and rear pumps of the duplex pump was 10 mL/r and 6 mL/r, respectively, and the working pressure was 25 MPa. The performance test of the whole machine was carried out. The performance test results of the whole machine showed that the straight-line driving offset rate of the power chassis was 1.9%, which met the requirements of the corresponding national standard ($\leq 6\%$). The walking speed of the whole machine was 5 km/h, the minimum turning radius was 1.08 m, the maximum climbing angle was 27° , the maximum lifting angle of the mounted tool was 30° , the response speed of the rear suspension device was 1 s, and the steering performance of the power chassis was good, which

收稿日期: 2024-03-12 修回日期: 2024-05-01

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27)、金华市科技计划项目(2021-2-016)和河北省现代农业产业技术体系苹果创新团队项目(HBCT2024150202)

作者简介: 王鹏飞(1986—), 男, 副教授, 主要从事果园机械装备研究, E-mail: wpf5769@126.com

通信作者: 杨欣(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现代农业装备设计与地面机器系统人机安全研究, E-mail: yangxin@hebau.edu.cn

can adapt to the narrow slope working environment of hilly and mountainous orchards. When the rotary tiller was mounted for rotary tillage operation, the stability coefficient of tillage width and tillage depth were 98.9% and 96.4%, respectively, which met the requirements of the national standard ($\geq 85\%$). The hydraulic control system of the crawler chassis of hilly and mountainous orchards conformed to the design standards of crawler tractors for mountainous orchards, which can provide a reference for the development of power chassis for hilly and mountainous orchards.

Key words: hilly and mountainous; power chassis; hydraulic system; AMESim

0 引言

丘陵山地环境复杂,果园耕地坡度范围在 $0^\circ \sim 25^\circ$ ^[1],农业装备的配套性和适应性差^[2],受立地条件和种植模式的影响,林果(含桑茶)生产机械化水平总体小于20%,远低于农作物耕种收综合机械化率73.11%^[3-5],所以急需设计一款操作简单、结构稳定、功能多样的动力底盘。

欧美地区地势平坦区域占比较大,果园平整度和通过性较好,所以机器大部分以轮式底盘为主,适合大面积作业^[6-8]。为适应丘陵山地的复杂地形环境,国内外学者对履带式动力底盘进行了一系列研究^[9-13]。日本的BY系列山地丘陵履带式底盘,在坡地作业中性能优异^[14];QUATRAK、ROBO与FLAILB-OT等厂家生产的底盘^[15],其特点是以液压系统作为核心、动力输出口多,小型机具连接更加方便,能够实现一机多用的目的。李善军等^[16]设计了一种全液压遥控式履带底盘,能适应丘陵山地的复杂地形环境,但是全液压系统在长时间工作后,液压油升温会导致动力减少,最终影响工作效果;同时也提出一款铰接转向仿形增程轮式动力底盘,该动力底盘可以很好地提高续航能力^[17];杨艳明等^[18]设计了一种自适应式丘陵山地拖拉机动力底盘,但该底盘采用机械传动方式,整机体积较大所以转弯半径大;李亚等^[19]设计了一种模糊PID控制方法控制履带式液压底盘的直线和转向行驶控制,双马达驱动的底盘体积增大且液压系统操作也更复杂。

本文结合丘陵山地果园田间管理作业的作业需求,设计一种液压控制、机械传动的动力底盘。对液压系统进行选型与仿真设计,完成整机液压控制,通过实机试验的结果验证整机的可行性与可信度。

1 丘陵山地果园动力底盘整机设计与工作原理

1.1 整机结构设计

丘陵山地果园动力底盘主要包括履带行走底盘、液压系统、静液压传动装置(Hydro static transmission, HST)、发动机和后悬挂装置等部分,能实现基于遥控控制的无人行走、转向及挂载机具的

升降工作,整机结构如图1所示。

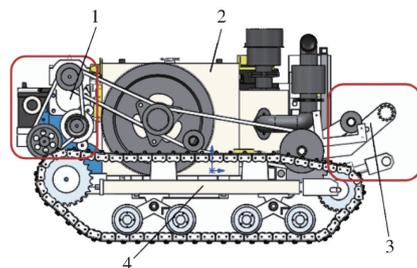


图1 丘陵山地果园履带式底盘结构图

Fig. 1 Structural diagram of air supply system

1. HST 传动装置 2. 发动机 3. 后悬挂装置 4. 行走装置

该底盘主要技术参数如表1所示。

表1 丘陵山地果园动力底盘主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of power chassis of hilly and mountainous orchards

参数	数值
发动机功率/kW	≥ 20
整机质量/kg	$\leq 1\ 000$
最大挂载机具质量/kg	200
工作速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	0 ~ 5
驱动轮半径/mm	105
最大爬坡角度/($^\circ$)	27

1.2 丘陵山地履带式底盘工作原理

动力底盘主要由机械动力传递系统和液压控制系统组成。发动机与HST、发电机、液压泵通过带传动方式连接,发动机输出的动力由液压泵和发电机通过带传动将机械能转化为液压能和电能。采用液压控制行走、转向及后悬挂升降过程,三点悬挂式,可挂载不同作业机具完成不同作业,实现一机多用的目的。

发动机提供的动力分为两路输出:一路与HST、发电机、双联泵连接,驱动履带式底盘行走、转向、后悬挂的升降,同时还可以将发电机产生的电能存储在蓄电池中,作为底盘中各种电控装置的动力源;另一路由带轮、离合器等将动力传递给挂载机具,如图2所示。

2 动力底盘液压系统设计

2.1 液压系统结构设计

丘陵山地果园动力底盘发动机的动力传递给液

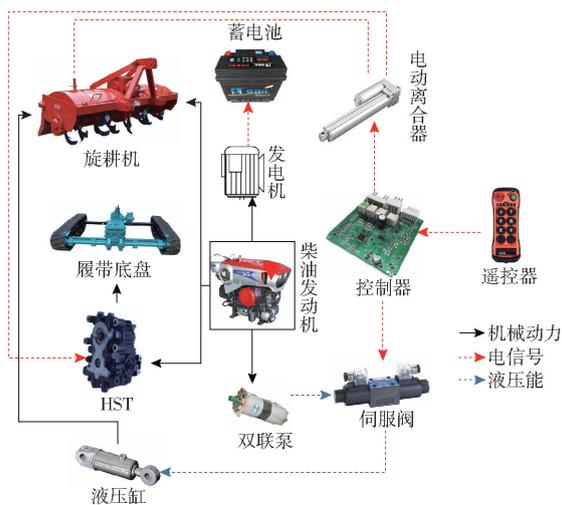


图2 传动控制系统简图

Fig. 2 Schematic of transmission control system

压系统,液压系统中各元件协调工作控制履带底盘完成各种工况下的动作。整体液压系统原理图如图3所示。

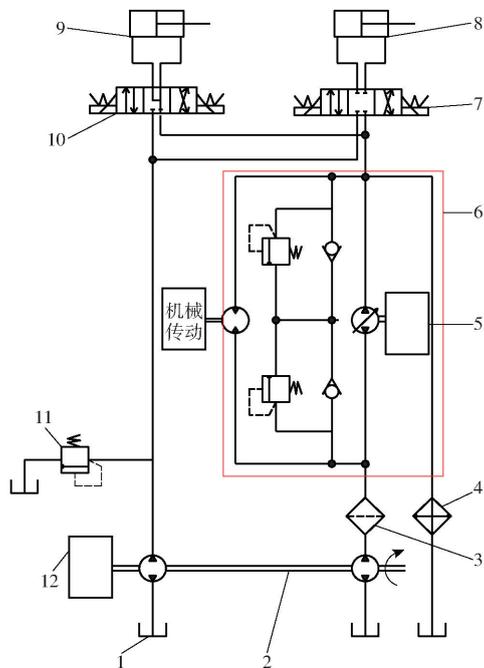


图3 液压系统原理图

Fig. 3 Schematic of hydraulic system

1. 液压油箱 2. 双联泵 3. 过滤器 4. 冷却器 5、12. 柴油发动机
6. HST 7、10. 三位四通换向阀 8. 左右转向模拟液压缸
9. 单杆液压缸 11. 溢流阀

该动力底盘能够在丘陵山地等非结构化路面完成前进、后退、转向及挂载旋耕机等农具的升降工作。工作时,柴油机带轮旋转通过带传动将能量传递给双联泵,然后双联泵将机械能传递到液压油,完成机械能到液压能的转化。三位四通换向阀10控制液压缸的升降完成对挂载机具的升降工作。当三位四通换向阀10左位接通时液压缸伸出,控制挂载机具提升;当三位四通换向阀10右位接通时

液压缸收缩,控制挂载机具下降;当三位四通换向阀10处于中位时控制挂载机具保持悬挂状态。三位四通换向阀7控制行走系统的转向,为便于仿真分析,将转向系统的控制简化为液压缸的伸缩控制,当三位四通换向阀7左位连通时控制机具左转向;当三位四通换向阀7右位连通时控制机具右转向;当三位四通换向阀7中位接通时控制直行前进或后退。

三位四通换向阀回油路上连接HST,流经单杆液压缸的液压油同时可为HST补油,为HST系统提供所需的润滑油和冷却油,以确保系统的正常运行。HST是一种特殊的液压传动方式,相比机械传动,能达到更大的扭矩比与转速比,且整体采用液压油的方式传递能量,运行更加平稳,省略了传统的变速箱,使体积更小,适合在丘陵山地等地形复杂的环境下实现转向操作;HST的基本原理为容积式调速回路,它由两个柱塞泵组成:一个作为液压油泵,另一个作为液压马达,液压泵通过换向阀管路连接液压马达构成无级变速结构^[20],如图4所示。

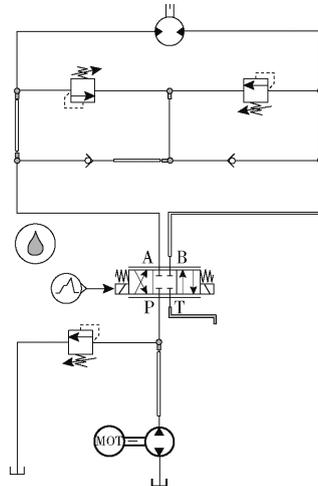


图4 HST基本原理图

Fig. 4 HST basic schematic

溢流阀组成稳压卸荷油路,设置溢流阀的最大压力,当系统压力过高时溢流阀接通,高压油液由溢流阀回到油箱,系统卸荷。由于HST会使液压油液变热,且整个液压系统工作过程中也会使液压油液升温,所以在HST后串联冷却器,冷却器可以将液压系统中的液压油液控制在正常的温度;为保证液压油路中油液保持干净,在双联泵泵后串联滤清器以去除液压油液中的污染物,防止污染物对液压元件产生损坏。

2.2 关键液压元件选型

2.2.1 HST

根据丘陵山地果园动力底盘的最高行驶速度计算马达的最高转速,为

$$n_m = \frac{Q_p}{V_m} = \frac{n_p V_p}{V_m} = \frac{1\ 000 V_i}{2 \times 60 \pi R} \quad (1)$$

式中 n_m ——驱动马达最高转速, r/min

Q_p ——液压泵流量, L/min

V_m ——液压马达排量, mL/r

n_p ——液压泵转速, 取 2 200 r/min

V_p ——液压泵排量, mL/r

V ——底盘最大行驶速度, 取 5 km/h

i ——变速箱最高传动比, 取 18.566

R ——驱动轮半径, 取 0.105 m

在不考虑风阻的情况下, 行驶最大阻力包括滚动阻力 F_f 、坡度阻力 F_a 、加速度阻力 F_j 、挂载机具阻力 F_m 、驱动马达输出的牵引力 F_t (图 5)。

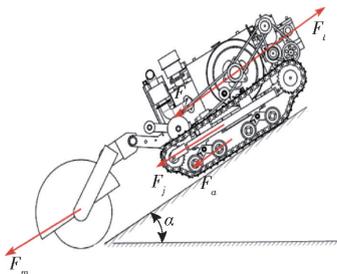


图 5 驱动马达最大牵引力分析图

Fig. 5 Analysis of maximum traction force of drive motor

驱动马达输出的牵引力计算式为

$$F_t = F_f + F_a + F_j + F_m \quad (2)$$

$$F_f = \mu m_1 g \cos \alpha \quad (3)$$

$$F_a = m_1 g \sin \alpha \quad (4)$$

$$F_j = m_1 a \delta \quad (5)$$

$$F_m = m_2 g \sin \alpha \quad (6)$$

式中 μ ——滚动阻力系数, 取 0.37^[20-21]

α ——坡度, 取 30°

m_1 ——丘陵山地果园动力底盘质量, 取 1 000 kg

m_2 ——挂载机具质量, 取 200 kg

g ——重力加速度, 取 9.8 m/s²

δ ——质量增加系数, 取 1.3^[22]

a ——行驶加速度, 取 0.8 m/s²

把相关数据代入式(2)~(6), 得到 F_t 为 10 060 N。

驱动马达所需输出扭矩为

$$T = \frac{F_t R}{i} = \frac{\Delta p V_m \eta_1}{2\pi} \quad (7)$$

得 $V_m = \frac{2\pi T}{\Delta p} \quad (8)$

式中 T ——驱动马达所需输出扭矩, N·m

Δp ——驱动马达额定工作压力, 取 22 MPa

η_1 ——液压马达机械效率, 取 0.9

把相关数据代入式(1)~(8), 得到 $n_m = 2\ 346$ r/min,

$V_m = 18$ mL/r, $T = 56.9$ N·m。

通过计算 HST 驱动马达和变量泵最高输出转速、最大输出扭矩, 选择合泉 T20C 型液压无级变速装置, 技术参数如表 2 所示。

表 2 HST 主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of HST

参数	数值
额定输出功率/kW	29
泵排量/(mL·r ⁻¹)	0~22
马达排量/(mL·r ⁻¹)	22
最高压力/MPa	28
额定压力/MPa	22

2.2.2 单杆液压缸

单杆液压缸是三点悬挂的主要提升装置, 图 6 为底盘后悬挂受力图, 丘陵山地中适合种植的耕地坡度最大为 25°, 故将后悬挂机具最大提升角度设为 30°, 以适应较多的丘陵山地地形; 根据系统类型和负载标准分别选择最大负载为 2 kN, 故选择液压缸的设计压力为 4 MPa, 回油腔压背压力为 0.5 MPa^[23]。

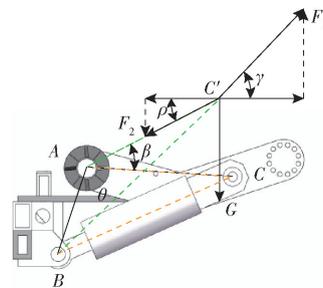


图 6 底盘后悬挂受力图

Fig. 6 Force diagram of chassis rear suspension

由三维模型可得, 在后挂载机具工作情况下 AB、BC 及 AC 的尺寸分别为 200、435、308 mm; 机具提升 30° 后 BC' 的长度为

$$L_{BC}^2 = L_{AB}^2 + L_{AC}^2 - 2L_{AB}L_{AC}\cos\theta \quad (9)$$

$$L_{BC'}^2 = L_{AB}^2 + L_{AC}^2 - 2L_{AB}L_{AC}\cos(\theta + \beta) \quad (10)$$

$$F_1 \sin \gamma = F_2 \sin \rho + G \quad (11)$$

$$F_1 \cos \gamma = F_2 \cos \rho \quad (12)$$

式中 θ ——上拉杆与铰接点 AB 连线夹角, (°)

F_1 ——单杆液压缸推力, N

F_2 ——上拉杆拉力, N

β ——液压缸最大提升角度, 取 30°

γ ——液压缸与水平面夹角, 取 41°

ρ ——上拉杆与水平线的夹角, 取 28°

G ——底盘最大负载, 取 2 000 N

β 、 γ 、 ρ 的角度均为在 AB、BC 及 AC 长度确定时测得。把相关数据代入式(9)~(12)中, 得 BC' 长度为 487 mm, 单杆液压缸推力 F_1 为 6 667 N; 上拉杆拉力 F_2 为 5 926 N。

液压缸压力和负载关系式为

$$p_1 A_1 - p_2 A_2 = \frac{F_1}{\eta_2} \quad (13)$$

$$D = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi\eta_2[p_1 - p_2(1 - \varphi^2)]}} \quad (14)$$

$$d = \varphi D \quad (15)$$

式中 p_1 ——液压缸缸筒内工作压力,取 4 MPa
 p_2 ——液压缸活塞杆内工作压力,取 0.5 MPa
 A_1 ——液压缸无杆腔内截面面积,mm²
 A_2 ——液压缸有杆腔内截面面积,mm²
 η_2 ——液压缸工作效率,取 0.9
 D ——液压缸缸筒直径,mm
 d ——活塞杆直径,mm
 φ ——杆径比

根据液压缸缸筒直径 D ,通过确定合适的杆径比 d/D 进而确定液压缸活塞杆的直径 d 。一般按照液压缸的速比和活塞杆的应力状态选择合适的杆径比。当活塞杆受拉时,一般取杆径比为 0.3 ~ 0.5;当活塞杆受压时,为保持压杆稳定性,一般取杆径比为 0.5 ~ 0.7。综合考虑履带底盘的受力情况和工作状态,取杆径比为 0.6。

把相关数据代入式(13)~(15)中,得到液压缸缸筒直径为 51 mm,液压缸活塞杆直径为 30 mm。通过查阅《液压设计手册》,最终确定液压缸的活塞杆直径为 28 mm,液压缸缸筒直径为 60 mm。伸长量为 52 mm。

2.2.3 双联泵

液压缸最大流量、伸长时间及液压泵流量关系式为

$$q = A_1 v \quad (16)$$

$$t = \frac{60 \times 10^3 A_1 s}{Q_1} \quad (17)$$

式中 v ——液压缸最大速度,取 0.05 m/s
 t ——液压缸伸长时间,s
 s ——液压缸行程,mm
 Q_1 ——液压缸流量,mL/min

把相关数据代入式(16)、(17)中,得到 q 为 8 L/min, t 为 1 s。确定双联泵的型号为 CBNL-G310/306-CFPL,额定压力为 25 MPa,前泵排量为 10 mL/r,后泵排量为 6 mL/r。

2.2.4 冷却器

整体的液压系统中,冷却器是不可缺少的元件,冷却器可以保证整体的液压油液温度控制在合适的范围内。冷却器一般安装在回油管或低压管路上。基于整体液压油路进行分析,HST 传动装置是机具行走系统的关键元件,HST 的制造精度要求较高,其

油温高的问题也是 HST 传动装置一大难点,故将冷却器安装在 HST 传动装置的回油路线。

液压系统的工作温度一般控制在 30 ~ 80℃,如果超出这个温度范围,温度持续升高会超过最佳工作温度上限,在无法正常工作的同时还会对整个液压系统产生较大危害^[24]。作业过程中使液压油升温的主要因素包括单杆液压缸的做功和 HST 传动装置做功,单靠液压油箱的散热不能满足液压系统的散热要求,所以要安装冷却器对液压油液进行降温。

计算冷却器散热量时,一般取系统总功率的 1/3 ~ 1/2 作为液压系统油温发热功率,本系统选取 1/3^[25],即系统发热量,整体液压系统的功率取 25 kW,得到系统的发热功率为 8.33 kW。

液压油箱的尺寸为 245 mm × 210 mm × 310 mm,则油箱的散热面积为

$$A \approx 6.66 \sqrt[3]{V_1} \quad (18)$$

式中 V_1 ——油箱容积,mm³

计算得到油箱散热面积为 1.9 m²。根据传热基本方程

$$Q_2 = kA\Delta t \quad (19)$$

式中 Q_2 ——液压油箱散热量,kW

k ——油箱热传导系数(取 $k = 15$,通风条件良好)

Δt ——温差,取 40℃

计算得出液压油箱的散热量为 1.14 kW。

冷却器散热量计算式为

$$Q_2 = Q - Q_1 \quad (20)$$

计算得到冷却器的散热量为 7.19 kW。

冷却器散热面积计算式为

$$A_3 = \frac{Q_3}{\Delta t_m \lambda} \quad (21)$$

式中 Q_3 ——冷却器散热量,kW

Δt_m ——冷却器进出口温差,取 12℃

λ ——冷却器传导系数,取 0.237

计算得到冷却器的散热面积为 2.5 m²。

选择 AH1012T-100L 型散热器,采用铝制板翅式结构,其技术参数如表 3 所示。

表 3 AH1012T-100L 型散热器参数
 Tab.3 Parameters of AH1012T-100L radiator

参数	数值
长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	420 × 355 × 45
散热面积/m ²	3.2
流量/(L·min ⁻¹)	100
工作压力/MPa	2
冷却能力/(kcal·h ⁻¹)	6 000

2.2.5 过滤器

过滤器的主要性能指标为过滤精度、压降特性、通油能力和纳垢容量。

该动力底盘的主要工作环境是丘陵山地果园，山地环境中的粉尘颗粒直径通常为 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ ；纳垢容量越大，则过滤器的使用寿命越长，与过滤器滤芯及其有效过滤面积有关。

选择 SP - 06 × 10 型过滤器，额定压力为 0.7 MPa，最大流量为 60 L/min，过滤精度为 10 μm 。

3 液压系统 AMESim 仿真分析

3.1 静液压传动液压系统仿真分析

根据 HST 的基本原理从 AMESim 模型库中调出相应的元件模型，创建 AMESimHST 仿真模型，如图 7 所示。

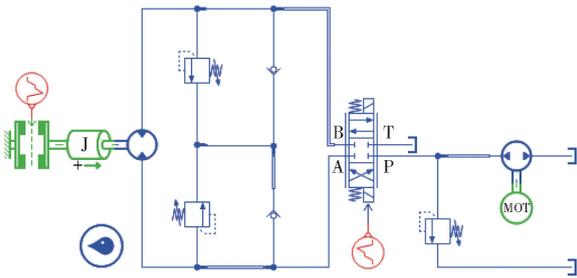


图 7 HST 传动装置 AMESim 仿真模型

Fig. 7 AMESim simulation model of HST transmission

HST 中液压泵的排量为 22 mL/r，液压马达的排量为 22 mL/r，溢流阀调定压力 22 MPa，设置负载扭矩为 56.9 N·m，发动机输入转速为 2 200 r/min。输入电信号状态，模拟该底盘的各种行进工况，如图 8 所示。0 ~ 10 s 为该底盘前进状态；10 ~ 20 s 为底盘停滞状态；20 ~ 30 s 为底盘后退状态。仿真结果显示马达转速为 2 192 r/min (图 9)，马达排量为 48 L/min (图 10)，与计算结果相近。

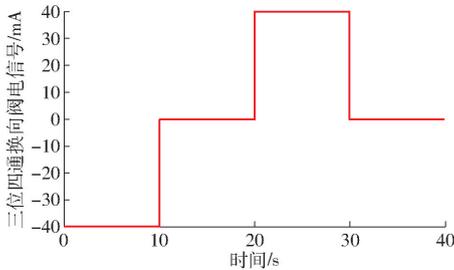


图 8 三位四通换向阀电信号仿真曲线

Fig. 8 Electrical signal simulation curve of three-position four-way reversing valve

3.2 悬挂提升系统仿真分析

3.2.1 悬挂提升系统模型建立

单杆液压缸施加 2 000 N 的持续压力，此时设置液压泵按正常工作进行输出，液压泵输入带轮转速

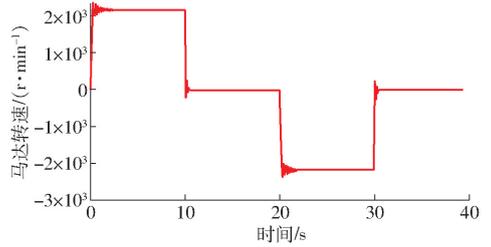


图 9 直线行进马达转速仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve of load linear travel

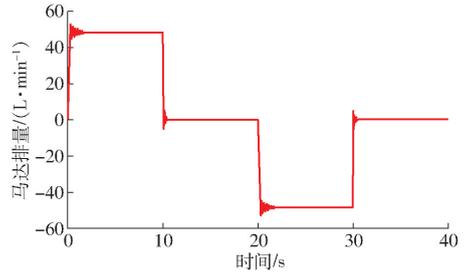


图 10 马达排量仿真曲线

Fig. 10 Motor displacement simulation curve

为 2 200 r/min；双联泵前泵输出排量为 10 mL/r，如图 11 所示。系统最大压力设为 4 MPa，三位四通换向阀电信号为 40 mA，如图 12 所示；电信号设置为 0 ~ 1 s 无输入信号，1 ~ 3 s 输出信号为 -40 mA，控制三位四通换向阀右位接通，控制单杆液压缸伸出，挂载机具升起，3 ~ 5 s 输出信号为 40 mA，控制单杆液压缸收缩，挂载机具下降；悬挂提升系统仿真模型如图 13 所示。

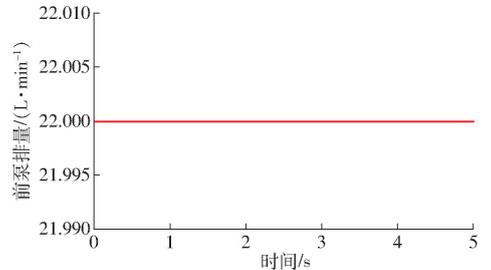


图 11 双联泵前泵输出排量

Fig. 11 Output displacement of front pump of duplex pump

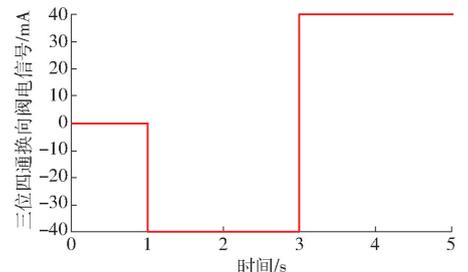


图 12 三位四通换向阀电信号仿真曲线

Fig. 12 Electrical signal simulation curve of three-position four-way reversing valve

单杆液压缸在 2 s 时活塞杆达到最远端，系统响应时间为 1 s，伸出 0.052 m，2 ~ 3 s 保持伸出位置。挂载机具保持悬停状态，在 3.7 s 时活塞杆收缩

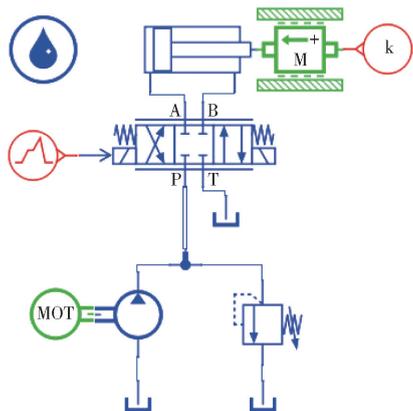


图 13 单杆液压缸仿真模型

Fig. 13 Simulation model of single-rod hydraulic cylinder

到最短距离;后挂载机具下降的系统响应时间为 0.7 s, 如图 14 所示。

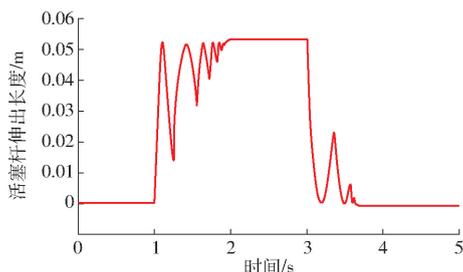


图 14 单杆液压缸伸出长度变化曲线

Fig. 14 Extension length curve of single-rod hydraulic cylinder

单杆液压缸活塞杆伸出速度受三位四通换向阀换位油路振荡影响,换向初期阀口开度不稳定,流量剧烈变化,单杆活塞杆伸出速度变化曲线如图 15 所示。

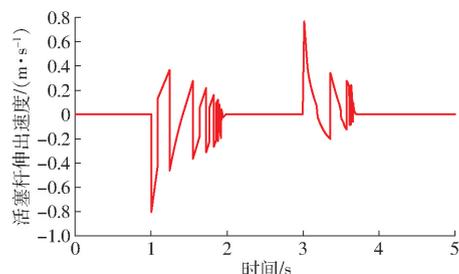


图 15 活塞杆伸出速度变化曲线

Fig. 15 Curve of velocity of piston rod extended

3.2.2 悬挂提升系统优化仿真分析

液压缸在 2 s 时活塞杆达到最远端,系统响应时间为 1 s,伸出 0.052 m,2~3 s 保持伸出位置,挂载机具为悬停状态,在 3.7 s 时活塞杆收缩到最短距离;后挂载机具下降的系统响应时间为 0.7 s。在整体的运动过程中,液压缸伸出速度不稳定,会对液压缸造成液压冲击,从而降低液压元件的使用寿命,同时液压缸伸出速度不稳定也会增加工人在使用过程中的安全隐患。针对这种情况对液压系统进行优化,在液压油进入三位四通换向阀后增加调速阀,调速阀可使液压油以稳定的速度进入三位四通换向阀

减少冲击,如图 16 所示;优化后液压油在三位四通换向阀换位工作时流动速度更稳定,有效减少液压冲击。优化后系统仿真结果如图 17、18 所示,单杆液压缸在三位系统换向阀换向阶段明显平稳,升降阶段速度稳定,减少了挂载机具升降过程中产生的液压振荡,从而延长液压元件以及机具的使用寿命。

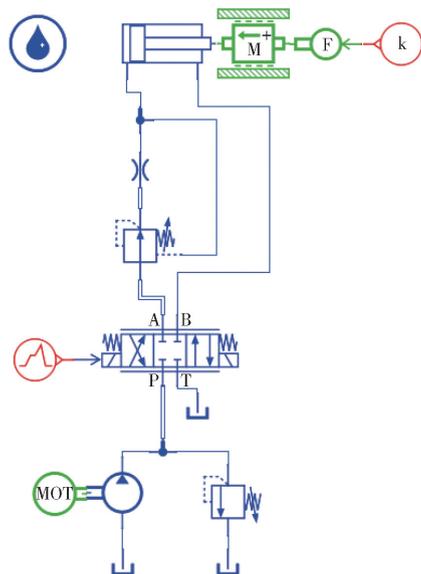


图 16 优化后悬挂 AMESim 仿真图

Fig. 16 Simulation of AMESim after optimized rear suspension

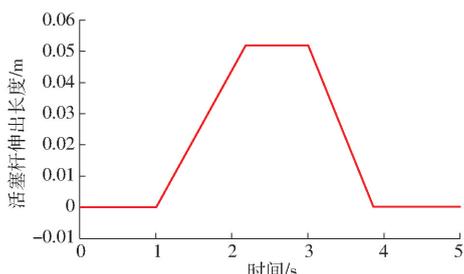


图 17 优化后液压缸伸出长度变化曲线

Fig. 17 Extension length curve of optimized rear hydraulic cylinder

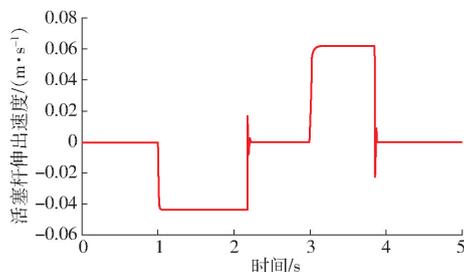


图 18 优化后液压缸伸出速度变化曲线

Fig. 18 Extension speed change curve of optimized rear hydraulic cylinder

4 整机性能试验

4.1 动力底盘直线行驶偏移率试验

根据 GB/T 15370.4—2012《农用拖拉机通用技术条件 第四部分:履带拖拉机》中对履带拖拉机直

线行驶的要求,拖拉机在干硬、坡度(纵横)不大于1%路面上的100 m跑偏量应不超过6 m。

在河北农业大学试验工厂的硬质路面上进行,选择一块平整硬质路面,分别在距边线0.1、0.2、0.3、0.5 m处做标记,并且标记出起始和终点线,保持底盘处于直行状态,中途不进行任何人工调整,动力底盘行驶到终点后,使用皮卷尺测量出履带底盘偏离标定直线的垂直距离,记为动力底盘直线行驶偏驶距离,并记录试验数据。

偏移率计算公式为

$$p = \frac{e}{l} \times 100\% \quad (22)$$

式中 p ——偏移率, % e ——偏移距离, m
 l ——标定距离, m

偏移距离试验值和偏移率计算值如表4所示。

表4 样机偏移量试验结果

Tab.4 Experimental results of prototype offsets

序号	与标准线距离/m	偏移距离/m	偏移率/%
1	50	1.2	2.4
2	30	0.3	1.0
3	20	0.5	2.5
4	10	0.2	2.0

根据履带底盘的直线行驶特性试验,本文采用液压控制机械传动的动力底盘直线行驶性能平均偏移率为1.9%,符合国家标准(<6%)。动力底盘产生偏驶可能是机器重量分配不均匀导致履带行驶阻力不一致、机械结构加工制造的误差、液压阀元件的泄漏和地面情况不一致导致阻力不同等。

4.2 动力底盘转向性能试验

为了分析该底盘在丘陵山地果园的转向性能,在河北农业大学实习工厂的硬质路面进行动力底盘转向性能试验。试验器材为钢卷尺。具体为履带底盘单边制动转向试验。试验方法为通过遥控器遥控底盘实现转向,如图19所示。操控履带底盘以单边



图19 最小转弯半径试验

Fig.19 In-situ steering test

制动原地转向方式旋转2圈,每圈测量4次,记录转向半径。

测量结果如表5所示。最终测得平均原地转向半径为1.08 m。

表5 原地转向半径测量结果

Tab.5 In-situ steering radius measurements results

序号	转向半径/m	序号	转向半径/m
1	1.10	5	1.13
2	1.05	6	1.10
3	1.10	7	1.03
4	1.12	8	1.08

4.3 动力底盘爬坡试验

动力底盘存在坡道直线行驶及坡道转弯动作。选择坡度为6.7°、17.4°的非结构化路面,操作动力底盘以2 km/h的速度完成坡道直线行驶以及坡道转弯的动作,观察其姿态稳定性,如图20所示。

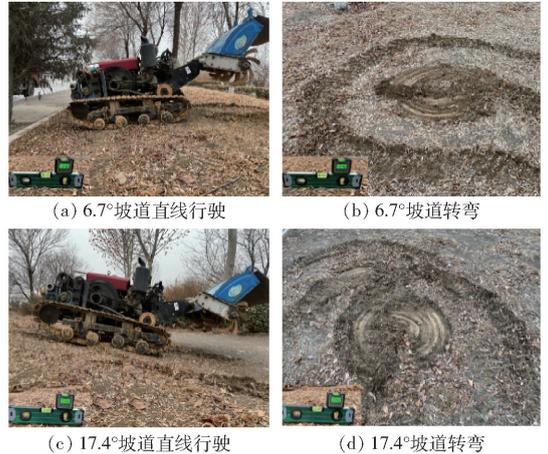


图20 坡道试验

Fig.20 Ramp tests

在非结构化路面上选择适合的坡道起点、终点,以及转弯处在坡道起点处;操作动力底盘停在坡道起点处,坡道起止点距离为50 m,先进行匀速上坡动作,到达坡道转弯处进行原地转弯动作,后以相同速度下坡。结果表明,动力底盘在坡度为6.7°及17.4°的非结构化路面完成3种姿态的动作稳定,未发生滑移现象。

4.4 动力底盘液压悬挂装置提升试验

履带式动力底盘的后悬挂提升装置主要作用是当割草机、旋耕机等挂载机具停止工作即运输途中时,能提升挂载机具完成运输,同时能挂载其他作业机具完成“一机多用”的目的^[26]。在动力底盘后端挂载旋耕机,测量其上下举升角度范围,并观察液压系统是否稳定工作,如图21所示。

试验结果表明,动力底盘液压悬挂装置的提升角度范围为0°~30°,提升时间为1 s,与AMESim仿



图21 液压悬挂装置提升试验

Fig. 21 Hydraulic suspension device lifting test

真结果吻合,且在工作过程中动作稳定,符合挂载机具要求。

4.5 动力底盘旋耕作业试验

动力底盘的挂载机具试验能直接反映动力底盘的动力输出情况,2024年3月5日在河北省保定市顺平果园进行旋耕试验,如图22所示。动力底盘挂载旋耕机,使用46号液压油,进行旋耕作业的环境气温为 2°C ,使用含水率测量仪和坚实度测量仪测得土壤参数为:土塘类别为黄棕壤,土壤含水率为10.26%,土壤紧实度为565 kPa。



图22 动力底盘果园旋耕作业试验

Fig. 22 Power chassis orchard rotary tillage operation test

按照当地果园旋耕要求,旋耕深度为10 cm。动力底盘以0.8 m/s进行旋耕作业,工作时间为2 h。旋耕作业后对液压油温进行检测,沿着动力底盘前进方向每隔10 m选取1个点,分别测量旋耕深度和宽度,计算耕深稳定性系数及耕宽稳定性系数,并观察其旋耕作业效果,得耕深稳定性系数为96.4%,耕宽稳定性系数为98.9%。

试验结果表明,动力底盘挂载旋耕机工作时耕深稳定性系数大于等于85%,满足国家标准要求。液压油温稳定,系统工作稳定,表明该动力底盘满足在丘陵山地果园中的作业要求。

5 结论

(1)针对丘陵山地果园劳动强度大、生产效率低、机械化程度低等问题,设计了一种基于液压控制、机械传动的丘陵山地果园履带式底盘,阐述分析了系统结构及工作原理。系统整体运行稳定、操作简单,连续工作时间长,满足丘陵山地果园稳定性高、适应性强等要求。

(2)对液压系统关键部件进行选型匹配,并建立静液压传动系统与悬挂提升系统AMESim仿真模型,对悬挂提升系统进行优化,将活塞杆伸出速度稳定在0.04 m/s,减少系统工作过程中产生的液压冲击,并进行整机性能试验。

(3)试验结果表明,整机行进速度为5 km/h,直线行驶偏移率为1.9%,转弯半径为1.08 m,在 6.7° 及 17.4° 坡地上直线行驶及转弯过程稳定,具有良好的地面通过性、适应性及行驶平顺性,后悬挂响应速度为1 s,耕深稳定性系数为96.4%,耕宽稳定性系数为98.9%,整机工作性能满足丘陵山地果园田间作业管理要求。

参 考 文 献

- [1] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. (in Chinese)
- [2] LIU Z, ZHANG G, CHU G, et al. Design matching and dynamic performance test for an HST-based drive system of a hillside crawler tractor[J]. Agriculture, 2021, 11: 466.
- [3] 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)
- [4] 孙景彬,曾令坤,应婧,等. 农业履带底盘关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 202-220.
SUN Jingbin, ZENG Lingkun, YING Jing, et al. Research status and prospect of key technologies of agricultural track chassis [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 202-220. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国农业农村部“十四五”全国农业机械化发展规划[EB/OL]. (2023-02-13). http://www.moa.gov.cn/govpublic/NYJXHGLS/202201/t20220105_6386316.htm.
- [6] 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)
- [7] 彭贺, 马文星, 王忠山, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49: 157-165.
PENG He, MA Wenxing, WANG Zhongshan, et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2019, 49: 157-165. (in Chinese)
- [8] 赵林亭, 邱绪云, 宋裕民, 等. 果园自走式电动底盘控制系统设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 120-126.
ZHAO Linting, QIU Xuyun, SONG Yumin, et al. Design and test of control system for orchard self-propelled electric chassis [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 120-126. (in Chinese)
- [9] 耿端阳, 孙延成, 李华彪, 等. 履带式坡地玉米收获机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 11-19.
GENG Duanyang, SUN Yancheng, LI Huabiao, et al. Design and experiment of crawler corn harvester for sloping fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13): 11-19. (in Chinese)
- [10] 曾山, 黄登攀, 杨文武, 等. 三角履带式再生稻收割机底盘的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52: 1943-1950.
ZENG Shan, HUANG Dengpan, YANG Wenwu, et al. Design and test of the chassis of triangular crawler reclaiming rice harvester[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52: 1943-1950. (in Chinese)
- [11] 扈凯, 张文毅, 刘宏俊, 等. 丘陵山地拖拉机液压驱动系统设计与仿真[J]. 机床与液压, 2021, 49(16): 93-97.
HU Kai, ZHANG Wenyi, LIU Hongjun, et al. Design and simulation of the hydraulic driving system of hilly tractors[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(16): 93-97. (in Chinese)
- [12] 郭占正, 苑士华, 荆崇波, 等. 基于 AMESim 的液压机械无级传动换挡过程建模与仿真[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 86-91.
GUO Zhanzheng, YUAN Shihua, JING Chongbo, et al. Modeling and simulation of shifting process in hydraulic machinery stepless transmission based on AMESim[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 86-91. (in Chinese)
- [13] 范永奎, 毛恩荣, 朱忠祥, 等. 丘陵山地拖拉机液压多点动力输出系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49: 477-485.
FAN Yongkui, MAO Enrong, ZHU Zhongxiang, et al. Design and experiment of hydraulic multi-point power output system for hilly and mountain tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49: 477-485. (in Chinese)
- [14] 王伟伟, 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)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 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/OL]. 农业机械学报, 1-16 [2025-04-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1984.s.20250314.1334.005.html>
LI Shanjun, PENG Jibo, NIU Chengqiang, et al. Design and test of articulated steering profiling extended range wheeled power chassis for hilly orchards[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1-16 [2025-04-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1984.s.20250314.1334.005.html>
- [18] 杨艳明, 张静, 郑德聪, 等. 自适应式丘陵山地拖拉机底盘传动及转向系统设计[J]. 农业工程, 2023, 13(3): 86-91.
YANG Yanming, ZHANG Jing, ZHENG Decong, et al. Design on adaptive chassis transmission and steering system for hilly tractor[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(3): 86-91. (in Chinese)
- [19] 李亚, 罗艳蕾, 罗瑜. 履带式液压驱动底盘行驶特性仿真研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(16): 160-164.
LI Ya, LUO Yanlei, LUO Yu. Simulation study on driving characteristics of tracked hydraulically driven chassis[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(16): 160-164. (in Chinese)
- [20] 谢磊. 装载机静液压传动(HST)系统控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
XIE Lei. Research on control strategy of hydrostatic transmission (HST) system of loader[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)

55(2):202-207.

ZHANG Yingbo, ZHAO Zilong, QIAN Zhongdong. Analysis of sediment erosion at suction side of double suction centrifugal pump blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2):202-207. (in Chinese)

- [19] LI S, YU G X, CHEN J J, et al. Aerodynamic design and experimental study of small flow rate centrifugal compressor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2551(1):012024.
- [20] 张宏杰, 花为, 于雯斐, 等. 氢燃料电池空压机用超高速永磁电机设计[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11):39-48.
ZHANG Hongjie, HUA Wei, YU Wenfei, et al. Design of ultra-high speed permanent magnet machine for hydrogen fuel cell air compressor[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11):39-48. (in Chinese)
- [21] LIN Z, ZUO Z, LI W, et al. Experimental and numerical analysis of the impeller backside cavity in a centrifugal compressor for CAES[J]. Energies, 2022, 15(2):420.
- [22] 经涛. 氢燃料电池离心空压机试验台搭建及性能测试[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(6):59-64.
JING Tao. Construction of hydrogen fuel cell centrifugal air compressor test bench and design and test of measurement and control system[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2023, 61(6):59-64. (in Chinese)
- [23] BAO H, FU J, ZHANG L, et al. Experimental study on performance attenuation characteristics of centrifugal air compressor for fuel cells[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(2):191-197.
- [24] SUN L, XI G, WU Y. Experimental and numerical simulation study on surge characteristics of high speed centrifugal compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(6):1519-1527.
- [25] LI J, WANG B, ZHENG X, et al. Experimental investigation on the aerodynamic instability process of a high-speed axial-centrifugal compressor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2024, 146(8):081018.
- [26] 祁大同. 离心式压缩机原理[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.

(上接第 711 页)

- [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] 赵殿报. 基于 HST 的山地丘陵履带式通用底盘研制[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
ZHAO Dianbao. Research and design of universal crawler based on HST in hilly areas[D] Zibo: Shandong University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [23] 张鲁生, 许胜元. 禄口机场液压电梯性能的分析与比较[J]. 机床与液压, 2012, 40(11):164-165, 87.
ZHANG Lusheng, XU Shengyuan. Analysis and comparison of the performance of hydraulic elevators in Lukou Airport[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(11):164-165, 87. (in Chinese)
- [24] 刘学峰, 张军强, 刘学串, 等. 4CZ-1 型大葱联合收获机液压系统设计研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(9):118-123.
LIU Xuefeng, ZHANG Junqiang, LIU Xuechuan, et al. Design and research of hydraulic system for 4CZ-1 onion combined harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(9):118-123. (in Chinese)
- [25] 栾春敏, 王真真, 姚瑶, 等. 拖拉机液压系统油温控制与改善分析[J]. 南方农机, 2024, 55(4):159-161, 188.
LUAN Chunmin, WANG Zhenzhen, YAO Yao, et al. Analysis on oil temperature control and improvement of tractor hydraulic system[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2024, 55(4):159-161, 188. (in Chinese)
- [26] 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)