doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.017

自走式辣椒种子直播机关键部件设计与试验

王　琳[1,2]　李淑娟[1]　赵研科[2]　狄慧鸽[1]　董春红[2]

(1.西安理工大学机械工程学院,西安 710048;2.智能农业动力装备全国重点实验室,洛阳 471000)

摘要:针对辣椒小粒种子精量播种与规模化生产需求,设计了全履带式辣椒种子直播机及其关键部件,集成铺管、覆膜、播种多系统协同作业。整机采用三阶段无级变速传动系统与模块化耦合架构,履带接地比压小于等于 20 kPa,牵引力达 17.78 kN,最小转向半径 1.36 m,通过圆半径小于等于 3.03 m,解决了麦椒套种模式下土壤压实与作业避障难题。基于气吸式排种器与鸭嘴滚筒成穴装置,构建播种深度自适应调节系统,实现行距 650 ~ 700 mm 可调、穴距合格率大于等于 95%、空穴率小于等于 2%。液压系统采用 HST 散热与双油缸电液比例闭环控制,缩短响应时间至 2.36 s,同步误差小于等于 2%。田间试验结果显示:整机平均无故障间隔时间(MTBF)为 120 h,有效度 99.5%,作业效率达 5.93 km/h。该研究为小粒径辣椒种子高精度直播提供了可靠装备。

关键词:辣椒种子直播机;三阶段无级变速传动系统;小粒种子;动力底盘

中图分类号:TP391;S126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)17-0177-11　　**OSID**:

Design and Testing of Key Components for Self-propelled Pepper Seed Direct Seeder

Wang Lin[1,2]　Li Shujuan[1]　Zhao Yanke[2]　Di Huige[1]　Dong Chunhong[2]

(1. *College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang* 471000, *China*)

Abstract: Aiming to address the requirements for precision sowing of small-grain chili seeds and large-scale production, a full-track chili seed direct seeder and its key components were designed, integrating the coordinated operation of multiple systems, including pipeline laying, film mulching, and sowing. The entire machine adopted a three-stage stepless variable speed transmission system and a modular coupling structure, with a track ground contact specific pressure of no greater than 20 kPa, a traction force of up to 17.78 kN, a minimum turning radius of 1.36 m, and a passing circle radius of no greater than 3.03 m. This design solved the problems of soil compaction and operation obstacle avoidance under the wheat-chili intercropping mode. Based on a pneumatic suction seed metering device and a duckbill roller hole-forming device, a sowing depth adaptive adjustment system was constructed. This system enabled adjustable row spacing of 650 ~ 700 mm, a plant spacing qualification rate of greater than or equal to 95%, and a missing hole rate of no greater than 2%. The hydraulic system adopted hydrostatic transmission (HST) heat dissipation and dual-cylinder electro-hydraulic proportional closed-loop control, shortening the response time to 2.36 s with a synchronization error of no greater than 2%. Field test results showed that the average mean time between failures (MTBF) of the entire machine was 120 h, the availability was 99.5%, and the operation efficiency reached 5.93 km/h. This research can provide reliable equipment for high-precision direct seeding of small-sized chili seeds and fill the gap in domestic special direct seeding equipment for chili peppers.

Key words: pepper seed direct seeder; three-stage continuously variable transmission system; small-sized seeds; power chassis

收稿日期:2025-09-09　修回日期:2025-09-22

基金项目:中烟办【2023】138 号,中国烟草总公司烟草农机研发与应用领域"揭榜挂帅"项目(110202301013)

作者简介:王琳(1986—),男,西安理工大学博士生,教授级高级工程师,主要从事智能农业动力装备研究,E-mail:wanglin8318@163.com

通信作者:李淑娟(1968—),女,教授,主要从事精密加工技术、制造过程建模与优化设计技术研究,E-mail:shujuanli@xaut.edu.cn

0 引言

辣椒富含维生素 C 及辣椒素等活性物质,兼具食用、药用和工业价值,已成为重要的经济作物[1-3]。根据联合国粮农组织(FAO)及农业农村部公布的数据,全球辣椒种植面积稳步增长。中国作为全球最大辣椒生产国,2024 年种植面积达 2.23×10^6 hm^2,占全球种植总面积的 36.7%,产量超 6.4×10^7 t,占世界总产量的 29.66%,连续多年位居世界首位,在国内形成以贵州、河南、云南等省份为核心种植区的产业群[4]。

2024 年我国主要农作物机械化率为 80%,蔬菜生产综合机械化率为 42%,显著低于主要农作物平均水平,其中辣椒等蔬菜机械化率仅有 31.5%。尤其种植机械的缺乏,是造成辣椒产业未能实现全程机械化的主要因素。传统辣椒育苗移栽模式需密集劳动力,且幼苗成活率易受极端气候影响[5]。相比之下,种子直播可简化流程、降低劳动强度并规避育苗风险。但辣椒种子粒径小,千粒种子质量约 5 ~ 7 g,形状不规则,而且播种精度要求高,通用播种设备难以实现合格粒距的单粒精准播种。目前,欧美精密播种技术虽先进,但其装备主要针对大粒径谷物或特定蔬菜,且因当地辣椒种植规模有限,鲜有专用机型。国内尚未实现辣椒直播机的产业化应用,周宇杰等[6]设计了一种人字形履带及差速转向模型的辣椒种子直播机,但是仅描述设计原理,未提供田间试验数据,难以客观评估实际性能。姚腊梅[7]设计了一种气吸式辣椒精量排种器,分析了排种器在吸种、携种和排种阶段的受力和运动情况,建立了相关工作过程的动力学和运动学模型,但仅包含播种机构不包含底盘研究。因此,研发适应小粒径辣椒种子的精量直播机迫在眉睫。

本文聚焦辣椒精量直播机的核心功能部件,通过创新结构设计解决小籽粒精取、低空穴率及播深一致性等难题,并开展田间试验验证其性能,为突破辣椒机械化直播瓶颈提供技术支撑。

1 整机总体结构

辣椒种子直播机是集成机械传动、液压控制和农艺要求的系统性农业工程装备,旨在满足辣椒播种“低漏播率、低伤种率、高密度”的核心农艺目标[8]。整机采用模块化设计理念,通过轻量化框架与可调节连接机构增强田间适应性与维护便捷性,其结构主要由行走系统、传动系统、液压系统和作业执行系统 4 大关键系统构成。

各系统间通过关键零部件结合,形成“动力输入→精量排种→同步覆土”的闭环作业流程,其整机结构布局如图 1 所示。

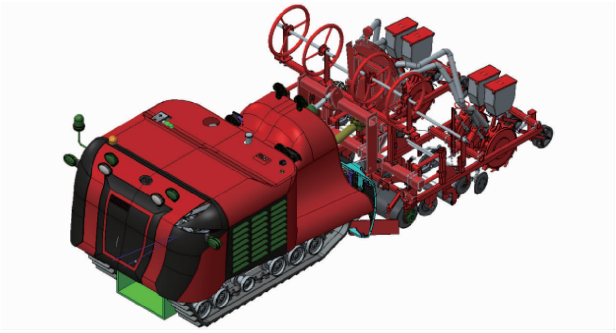

图 1 整机结构布局三维效果图

Fig. 1 3D effect diagram of overall structural layout

辣椒种子直播机关键系统设置如下:

(1)行走系统采用全履带式设计,平履带布置,接地比压小于等于 20 kPa,离地间隙大于等于 380 mm,通过性较好。配置丝杠张紧机构,大幅降低了土壤压实(较轮式降低 40%),可满足辣椒出苗要求。

(2)传动系统采用三阶段无级变速(HST)结构,作业速度实现 0 ~ 8.5 km/h 无级可调,提升力最大为 13 kN。

(3)动力输出轴(PTO)可同时适配不同拖拉机型号的转速与扭矩输出特性,实现动力传递的高同步性、抗冲击性及宽域调速能力。

(4)提升液压系统采用负载敏感变量泵与电液比例阀组成的压力-流量复合控制回路,系统工作压力设定为 20 MPa,流量 0 ~ 30 L/min,通过双联齿轮泵实现动力分流。

(5)作业执行系统为 4 行同步作业模块,集成铺管、覆膜、播种功能,采用气吸式精量排种器,行距通过液压伺服实现 650 ~ 700 mm/300 ~ 350 mm 宽窄行无级调节。

整机规格参数如表 1 所示。

2 关键零部件设计

2.1 行走系统

行走系统作为辣椒种子直播机实现田间作业的核心载体,承担着整机动力传输、负载支撑与地形适应的关键功能[9]。本系统设计满足以下核心要求:①保证整机附着性能,降低接地压力(小于等于 20 kPa),减小滚动阻力。②提高零部件使用寿命(设计寿命大于等于 3 000 h)。③适应丘陵、平原、沙地等多种地形(爬坡能力小于等于 25°)。④满足麦椒套种模式需求,兼顾小麦收获后茬口高度(小于等于 15 cm)与垄沟作业稳定性,行走系统结构如图 2 所示。

基于整机参数和行走系统特性，采用理论分析法对附着性能、行驶阻力和承载能力进行量化评估[10]。

表 1　整机规格参数

Tab. 1　Technical specifications of complete machine

参数	数值/型式
整机型式	全履带式
最小离地间隙/mm	380(行车架斜撑底部)
履带接地长度/mm	1 445
整机机架型式	全架
发动机标定功率/kW	37
发动机转速/(r·min^{-1})	1 600
排放标准	非道路移动机械国四排放标准
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 573×1 885×1 500 (配装铺管覆膜播种机)
结构质量/kg	主车:1 566;整机配铺管覆膜播种机:2 156;配旋耕施肥装置:1 931
轴距/mm	1 355
轨距/mm	1 000
挡位数	3
各挡理论速度/(km·h^{-1})	前进/倒退: 0～4.57,0～5.93,0～8.51
动力输出轴额定输出功率/kW	32
悬挂点处提升力/kN	13
播种行数/行	4
取种方式	气吸式
行距/mm	650～700/350～300(宽窄行可调)
株距/mm	188(更换播种轮可调整株距)
覆膜宽度/mm	600
铺管行数/行	2

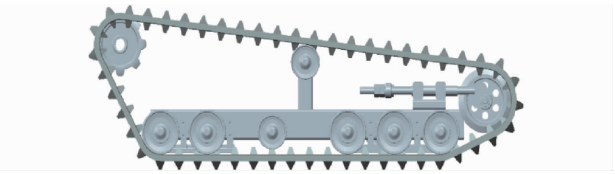

图 2　行走系统结构图

Fig. 2　Schematic of travel system

整机在塑性土壤上所产生的最大推进力 F_H 可按理论剪切强度和土壤剪切面积计算公式估算，即

$$F_H = 2^b L_0 C + m_s g tg^{\phi} \tag{1}$$

为更精确的计算，采用改进的 M. G. 贝克模型，考虑履刺产生的附加推进力影响，即

$$F_H = 2^b L_0 C\left(1+\frac{2h}{b}\right) + m_s g tg^{\phi}\left(1+0.64\frac{h}{b}\arctan\frac{h}{b}\right) \tag{2}$$

式中　b——履带板宽度

L_0——履带接地长度

h——履刺高度

m_s——拖拉机使用质量

C——土壤内聚力系数

ϕ——土壤内摩擦角

t——履带节距

g——重力加速度

土壤力学参数值受土壤颗粒直径和含水率的影响较大，在选取土壤力学参数时，必须注意土壤的物理性质和土壤含水率。一般砂壤土的含水率在 12%～43% 范围内；土壤内聚力系数 C 为 1.5～3 kPa；土壤内摩擦角 ϕ 在 20°～38°范围内。一般轻黏土的土壤含水率为 22%～40%；土壤内聚力系数 C 为 2.5～60 kPa；土壤内摩擦角 ϕ 为 6°～20°。一般黏土的含水率为 38%～55%；土壤内聚力系数 C 为 2～7 kPa；土壤内摩擦角 ϕ 为 10°～17°。整机挂钩牵引力 F_T 的计算公式为

$$F_T = F_H - F_f' \tag{3}$$

行驶阻力 F_f' 的计算公式为

$$F_f' = \frac{2}{(n+1)(K_C + bK_{\phi})^{1/n}}\left(\frac{m_s g}{2L}\right)^{\frac{n+1}{n}} \tag{4}$$

式中　n——土壤压缩变形系数

F_f'——压缩土壤的滚动阻力

K_C——土壤内聚性变形模量

K_{ϕ}——土壤摩擦性变形模量

L——拖拉机轴距

履带下陷量 z 的计算公式为

$$z = \left[\frac{m_s g}{2L_0(K_C + bK_{\phi})}\right]^{1/n} \tag{5}$$

通过理论分析可得以下关键设计优化方向：①行走装置性能与土壤参数密切相关，需根据典型作业区域的土壤力学特性确定行走装置参数。②对于内聚性土壤(C 值大)，增大接地面积可显著提高履带驱动力。③对于摩擦性土壤(ϕ 值大)，适当增加整机质量可改善驱动力。④履刺高度对附加驱动力的影响在内聚性土壤中更为显著。⑤在接地比压不变的情况下，长而窄的履带(长宽比大于等于 7)比短而宽的履带行驶阻力小 15%～25%。⑥在摩擦性土壤中，增大履带宽度可有效提高表层通过能力。

根据式(2)～(4)代入参数，可得整机挂钩最大牵引力 F_T = 17.78 kN。

2.2　传动系统

传动系统作为辣椒种子直播机的动力传输核心，其性能直接决定了播种效率、播种深度均匀性及株距一致性等核心农艺指标[11]。针对辣椒种子粒径小(平均直径约为 2 mm)、播种密度高(大于等于 1.5×10^5 粒/hm^2)、地形适应性强等农艺特点，传动

系统需同时满足低振动、高同步性、多级调速及可靠过载保护等设计要求，同时兼顾轻量化与模块化布局，以适应不同种植模式与田间作业环境[12]。

针对传统传动方案在复杂工况下存在的传动效率衰减、同步精度不足等问题，本研究提出一种多级耦合传动架构，采用机械与静液压（Hydraulic static transmission，HST）复合驱动方式。系统采用三级变速结构，作业速度控制在 0 ~ 8.51 km/h 之间，满足不同土壤条件下的速度调节需求：①一级传动：发动机→HST 泵/马达组，实现无级变速调节。②二级传动：行星齿轮减速机构，速比 1∶3.2，实现扭矩倍增。③三级传动：同步带传动至播种单元，降低振动传递。④控制模块：集成 CAN 总线控制器，实时监测负载变化。

传动系统原理如图 3 所示，传动系统结构如图 4 所示。

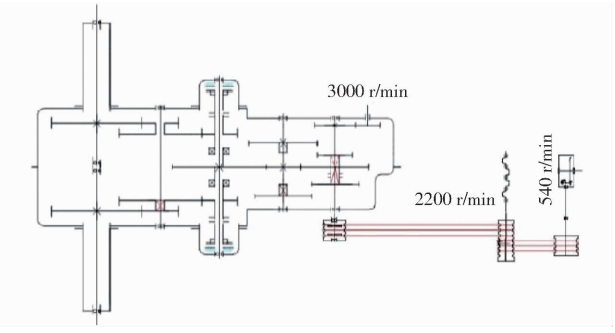

图 3 传动系统原理图

Fig. 3 Schematic of transmission system

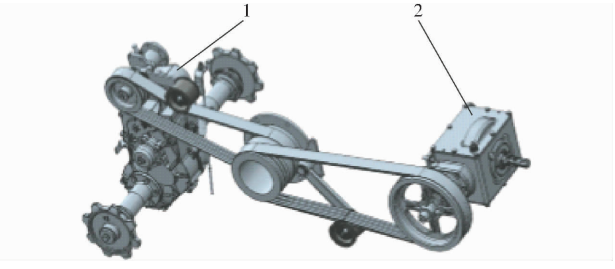

图 4 传动系统结构图

Fig. 4 Structural diagram of transmission system

1. 变速箱 2. 动力输出装置

传动系统传动比根据整机工作速度和发动机标定转速确定。整机某挡（j 挡）总传动比 $i_{\Sigma j}$ 计算式为

$$i_{\Sigma j}=0.377\frac{n_{eb}r_d}{v_{lj}} \tag{6}$$

式中 n_{eb}——发动机标定转速，r/min

r_d——驱动轮动力半径，可按轮胎新胎外半径乘 0.935 计算或履带驱动轮半径，m

v_{lj}——整机某挡（j 挡）理论工作速度，km/h

代入参数，可得 3 段传动比和理论速度，如表 2 所示。

表 2 传动系统 3 段变速传动比及理论速度

Tab. 2 Three stage variable transmission ratio and theoretical speed of transmission system

段位	传动比	理论速度/(km·h^{-1})	适应工况
1 段	28.341	4.57	重质土壤、高湿度作业
2 段	21.854	5.93	标准土壤条件
3 段	15.225	8.51	轻质土壤、平坦地形

传动系统关键技术参数与传统方案对比，性能提升效果显著：从速度调节方面，传统方案采用“离散挡位”调速，本方案采用“HST（静液压传动）无级 + 三挡机械”调速模式，基于此，速度调节精度较传统方案提升 65%。从传动效率方面，传统方案传动效率区间为 65% ~75%，本方案传动效率提升至大于等于 88%，相对应能耗降低 18% ~25%。上述参数优化使播种精度、动力利用率及整机作业可靠性得到有效提升。

2.3 动力输出轴

动力输出轴（PTO）作为辣椒种子直播机与拖拉机动力衔接的核心装置，承担着将拖拉机动力高效、稳定传输至播种单元的关键任务，其性能直接影响播种精度、动力利用率及整机作业可靠性[13]。针对辣椒播种农艺对低损伤、高密度及株距一致性的严苛要求，PTO 系统需实现动力传递的高同步性、抗冲击性及宽域调速能力，同时需适配不同拖拉机型号的转速与扭矩输出特性，避免因动力波动导致的漏播或重播问题。

为确保胶带不打滑且具有较高传动效率，需合理确定胶带型号、长度、带轮直径及 V 带根数。

根据发动机功率，计算带传动功率 P_j，计算式为

$$P_j=K_AP \tag{7}$$

式中 K_A——工况系数，取 1.1 ~1.3

P——传递功率，kW

将参数代入公式（7）得，P_j = 40.43 kW，根据带传动功率 P_j 和小带轮转速 n_1，选定 V 带 B 型号。

大带轮直径 d_{d2} 计算式为

$$d_{d2}=id_{d1}(1-\varepsilon) \tag{8}$$

式中 i——传动比

d_{d1}——小带轮计算直径，mm

ε——弹性滑动率，取 0.02

带速 $v\approx20$ m/s 时，可充分发挥带传动能力，一般 v 不低于 5 m/s，计算式为

$$v=\frac{\pi d_{d1}n_1}{60\times1\,000}\leqslant v_{\max} \tag{9}$$

式中 $v_{\max}$——最大允许速度，取 30 m/s

将参数代入公式（9）得 v = 25.11 m/s（≤30 m/s），

满足选型要求。

初定中心距 a_0，计算公式为

$$0.7(d_{d1}+d_{d2})\leqslant a_0\leqslant 2(d_{d1}+d_{d2}) \tag{10}$$

小带轮包角 α_1 一般大于 120°，最低不小于 90°，计算公式为

$$\alpha_1 = 180° - \frac{d_{d2}-d_{d1}}{\alpha}\times 57.3° \tag{11}$$

式中　α——带轮包角

将式中参数代入公式(11)得 $\alpha_1 = 171.81°$(≥120°)，满足选型要求。

V 带根数 Z 计算公式为

$$Z = \frac{P_j}{(P_1+\Delta P_1)K_\alpha K_L} \tag{12}$$

式中　P_1——单根 V 带传递功率，kW

ΔP_1——单根 V 带传递功率增量，kW

K_α——包角修正系数，取 0.82 ~ 1.00

K_L——带长修正系数，取 0.84 ~ 0.98

将参数代入公式(12)，得 $Z = 8.09$ 根，取整数，$Z = 8$ 根。

动力输出轴功率 P_d 计算式为

$$P_d = P\eta_1\eta_2 \tag{13}$$

式中　η_1——PTO 锥齿轮传动效率，一般为 97%

η_2——V 带传动效率，一般为 85% ~95%

将参数代入公式(13)，得 $P_d = 30.30$ kW。

2.4　液压提升系统

液压提升系统作为辣椒种子直播机播种深度控制的核心执行单元，其动态稳定性与同步精度直接影响种床成型质量与出苗均匀性[14-15]。液压系统采用位置闭环和压力闭环的双闭环控制策略，实现播种深度控制精度 ±1 mm，提升同步误差不大于 0.5 mm，确保在复杂地形条件下仍能保持一致的播种深度。

提升油缸选择 ME454 - 55 - 016 - 1 型，额定工作压力 20 MPa，缸径 63 mm，行程 142 mm，安装距离 370 mm；提升电磁阀需要使提升器满足提升、中立、浮动 3 种状态。为实现该功能，采用一个两位四通和一个两位三通电磁阀形成一个电磁阀组。为降低下降冲击，液压系统串联一个单向节流阀。提升油缸和电磁阀组结构如图 5 所示。

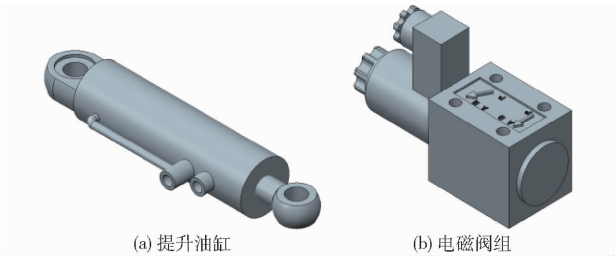

图 5　提升油缸和电磁阀组结构图

Fig. 5　Structural diagrams of lifting cylinder and solenoid valve assembly

校核实际提升速度：在双油缸电液比例闭环控制系统中，提升速度由液压缸有效作用面积与系统供油流量共同决定，基于流体连续性方程与液压缸运动学关系，单油缸理论提升速度 v_t 计算公式为

$$v_t = \frac{Q}{A_{eff}} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)} \tag{14}$$

式中　Q——输入油缸无杆腔的流量，m^3/s

A_{eff}——油缸活塞有效作用面积，m^2

D——活塞直径，m

d——活塞杆直径，m

考虑双缸同步误差时，实际提升速度受负载压力差与比例阀响应特性影响，需引入同步补偿系数 η，计算公式为

$$v_s = \eta\frac{Q_t}{2A_{eff}} \tag{15}$$

式中　v_s——实际提升速度，m/s

Q_t——系统总供油流量，m^3/s

η——同步补偿系数，通过位移传感器反馈实时修正，取 0.98 ~ 1.02

将参数代入公式(15)，得 $v_s = 79.4$ mm/s，大于推荐最小速度 60 mm/s，满足要求，选型合适。

校核提升时间：提升时间由液压缸行程与提升速度共同决定，结合双油缸同步控制特性，单杠匀速运动理论提升时间 t_t 计算公式为

$$t_t = \frac{s\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)}{Q} \tag{16}$$

式中　s——液压缸提升行程，m

考虑双缸同步误差及动态负载影响，实际提升时间 t_s 需结合同步补偿系数 η 与系统总流量 Q_t，计算公式为

$$t_s = \frac{2sA_{eff}}{\eta Q_t} \tag{17}$$

将参数代入公式(17)，得 $t_s = 2.21$ s，通常要求提升时间小于 5 s，满足作业效率要求。

2.5　作业系统

2.5.1　工作原理

作业系统采用一体化集成设计，能实现平土镇压、滴管铺设、地膜覆盖、精量播种和穴孔镇压 5 大功能。各模块通过精密协同控制，确保滴管铺设精度 ±1 cm，覆膜平整度大于等于 95%，播种深度一致性 ±1 mm，空穴率小于等于 2%，满足辣椒种植的高标准农艺要求，作业系统结构如图 6 所示。

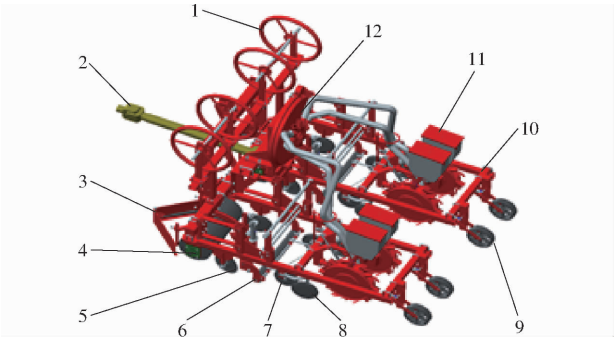

图 6 作业系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of work system

1. 滴管带支架 2. 风机传动轴 3. 平土板总成 4. 镇压辊总成 5. 开沟圆盘 6. 展膜辊 7. 压膜辊 8. 覆土圆盘 9. 镇压轮总成 10. 机架总成 11. 播种单体总成 12. 风机系统

作业系统工作流程如下:①平整镇压,平土板和镇压辊将地面推平并压实,形成平整种床。②滴管铺设,滴管带经导向管、展平辊平铺于压实后的两行窄苗带中间。③覆膜作业,开沟圆盘开出膜沟,地膜经导膜杆、展膜辊、压膜辊拉伸展平,覆土圆盘压住地膜边。④精量播种,负压吸附取种,鸭嘴成穴器破膜入土成穴,种子准确落入穴底。⑤穴孔镇压,镇压轮根据土壤松软情况调整镇压力,对穴播后的苗带压实。

2.5.2 作业系统布置特点及性能指标

作业系统采用紧凑型模块化设计,整平机构总成安装于仿形机架上,具有优异的作业适应性。作业系统集成铺管、覆膜、播种 3 大功能。铺管作业模块支撑间距可调,可适应不同规格滴管带作业需求,展管辊转动灵活,配合导向管,铺管顺畅不伤管;覆膜作业模块采用开沟圆盘开出膜沟,开沟宽度可调,展膜辊、压膜辊和覆土圆盘共同作用,将地膜纵横向展平,防止播种时种穴错误;播种作业模块采用精量气吸式排种器、鸭嘴滚筒式点播器,可实现精量取种、定株距播种;机架总成采用四连杆仿形机构,可满足不同土壤工况作业要求;风力模块由 PTO 驱动风机高速转动,在排种器气室内形成负压,在负压作用下种盘吸附种子,实现精量取种;作业系统配置有播种监控系统,可实现实时漏种报警功能。作业系统性能指标如表 3 所示。

(1)机架模块

机架模块包括:悬挂架总成、主梁、四连杆机构、左纵梁总成、右纵梁总成 5 部分。机架作为作业系统承重和传力的核心部件,采用高强度板材和型钢制造,具有良好的刚性,抗扭性能优异。四连杆仿形机构可确保设备在不同土壤工况下保持稳定作业姿态。机架模块结构如图 7 所示。

悬挂架总成采用 2N 类标准悬挂接口,三点悬挂快速挂接,通用性强,适配主流拖拉机,液压快速提升装置。主梁结构采用高强度矩形管焊接,配置有模块化安装接口。

表 3 作业系统主要性能指标

Tab. 3 Main performance indicators of operating system

参数	数值/型式	技术特点
外形尺寸/(mm × mm × mm)	2 270 × 1 800 × 2 270	紧凑型设计,转弯半径小
铺膜幅数/幅	2	双行同步作业
工作幅宽/mm	2 000	适应标准种植模式
播种行数/行	4	双膜 4 行配置
穴粒数/粒	2	单穴双粒,节约种子
行距/mm	300 ~ 350(窄行);650 ~ 700(宽行)	可调式行距配置
播种深度/mm	20 ~ 30	液压可调,适应不同土壤
结构质量/kg	590	轻量化设计
配套功率/kW	26 ~ 37	适应主流拖拉机
作业速度/(km·h^{-1})	3 ~ 4	高效作业速度
排种器型式	气吸式排种器 + 鸭嘴滚筒式点播器	精量播种技术
结构型式	悬挂式	便捷挂接
风机输入转速/(r·min^{-1})	540 ~ 720	PTO 驱动,转速可调
空穴率/%	≤2	高可靠性播种
重播率/%	≤1.5	高可靠性播种
地膜宽度/mm	600	标准地膜规格

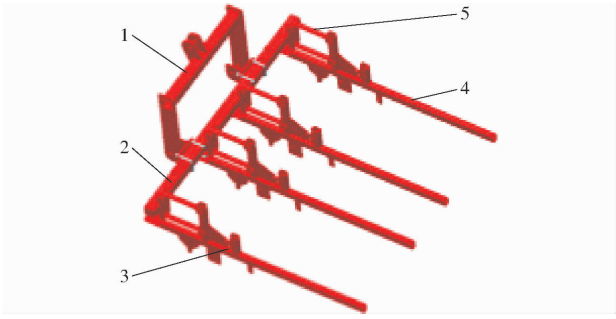

图 7 机架模块结构图

Fig. 7 Structural diagram of rack module assembly

1. 悬挂架总成 2. 主梁 3. 左纵梁总成 4. 右纵梁总成 5. 四连杆机构

(2)铺管作业模块

铺管作业模块的主要功能是将滴灌管精准铺放在两苗带中间,可适应不同规格滴管带作业需求[16]。展管辊转动灵活,配合导向管可实现铺管顺畅、不伤管,铺管作业模块结构如图 8 所示。

(3)覆膜作业模块

覆膜作业模块采用开沟圆盘开出膜沟,展膜辊、压膜辊和覆土圆盘协同作用,实现地膜纵横向展平[17-19]。开沟圆盘、压膜辊和覆土圆盘横向可调,

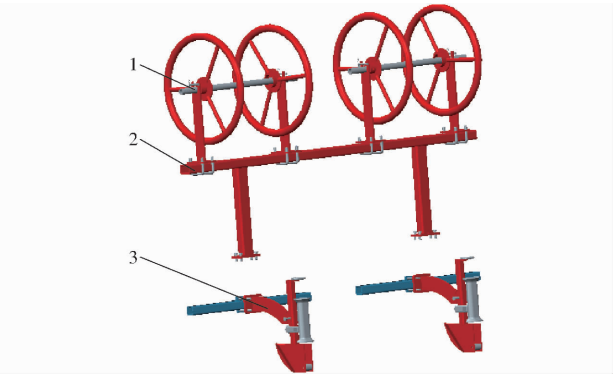

图 8　铺管作业模块结构图

Fig. 8　Structural diagram of pipe-laying operation module

1. 滴管带支撑　2. 支架　3. 工作部件

可满足 600 mm 薄膜覆土宽度要求，覆膜作业模块结构如图 9 所示。开沟圆盘直径 350 mm，厚度 3 mm，开沟深度 50 ~ 100 mm 可调，开沟宽度 100 ~ 150 mm 可调，圆盘表面镀铬处理，耐磨防粘；展膜机构采用 3 级展膜设计，导膜杆→展膜辊→压膜辊，展膜辊直径 120 mm，长度 700 mm；压膜辊橡胶表面压力可调，覆膜平整度大于等于 95%；覆土圆盘直径 300 mm，倾角可调，覆土厚度 30 ~ 50 mm，覆土宽度 60 ~ 80 mm，膜边压实度大于等于 90%。

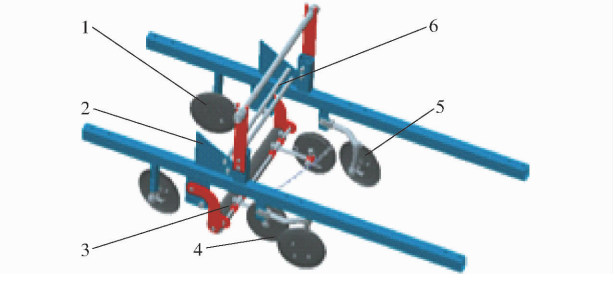

图 9　覆膜作业模块结构图

Fig. 9　Structure diagram of laminating operation module

1. 开沟圆盘　2. 支架　3. 展膜辊　4. 压膜辊　5. 覆土圆盘　6. 展膜管

(4)播种作业模块

播种作业模块采用精量气吸式排种器与鸭嘴滚筒式点播器组合，可实现取种精量、株距恒定、播深稳定的农艺要求[20-21]。单穴双粒设计可节约种子，省去定苗工序，达到节本增效作用，播种作业模块结构如图 10 所示。

播种作业模块采用气吸式排种器，PTO 驱动风机，负压 8 ~ 12 kPa，精密种盘，适配不同辣椒品种，光电检测，实时监控排种状态，重播率小于等于 1.5%，空穴率小于等于 2%；鸭嘴成穴器采用鸭嘴式滚筒设计，破膜入土深度 20 ~ 30 mm，双鸭嘴同步开合，耐磨合金材质，寿命大于等于 133.3 hm^2；弹簧强压机构，压力可调范围 500 ~ 2 000 N。该部件可实现单穴双粒的精量播种效果，节约种子，省去定苗工序，从而实现节本增效的作用。

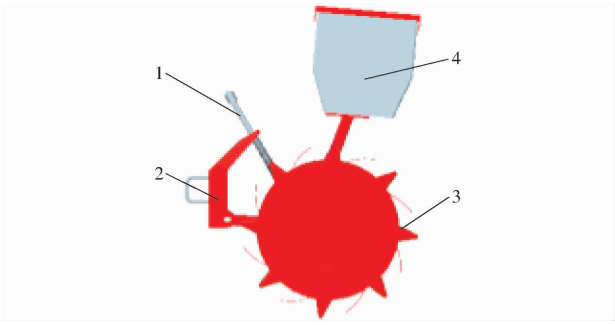

图 10　播种作业模块结构图

Fig. 10　System architecture diagram of sowing operation module

1. 弹簧强压机构　2. 支架　3. 排种器　4. 种箱

作业系统铺管、覆膜、播种同步完成，作业效率可提高 40%，减少拖拉机进地次数，降低能耗 25%。

3　田间试验

田间试验作为辣椒种子直播机研发的关键验证环节，作业性能试验与可靠性试验是评估装备作业效能与实用价值的核心依据。2024 年 1 月在河南省漯河市临颍县王岗镇开展了相关试验，王岗镇种植面积 5 733.3 hm^2，占总耕地面积 7 466.6 hm^2 的 76.8%。试验作业地表工况如图 11 所示。



图 11　试验作业地表工况

Fig. 11　Soil surface conditions prior to field testing

3.1　试验依据

试验方法和判定依据参照国家标准 GB/T 3871.2—2006《农业拖拉机 试验规程 第 2 部分：整机参数测量》、国家标准 GB/T 3871.3—2006《农业拖拉机 试验规程 第 3 部分：动力输出轴功率试验》、国家标准 GB/T 3871.4—2006《农业拖拉机 试验规程 第 4 部分：后置三点悬挂装置提升能力》、国家标准 GB/T 3871.5—2022《农业拖拉机 试验规程 第 5 部分：转向圆和通过圆直径》、国家标准 GB/T 15370.4—2012《农业拖拉机 通用技术条件 第 4 部分：履带拖拉机》、国家标准 GB/T 20341—2016《农业拖拉机和自走式机械 操作者操纵装置 操纵力、操纵方向、操纵位置和方法》、行业标准 DG/T 027—2019《旋耕播种机》进行。为降低试验误差，所有试验均在同一工况下进行 3 次，最终试验结果取 3 次

试验结果的平均值。

3.2 试验设计及结果

3.2.1 直线行驶性能和操纵装置最大操纵力试验

直线行驶性与操纵装置最大操纵力测量是评估辣椒种子直播机作业质量与人机交互性能的核心环节[22]。直线行驶性试验通过量化直播机路径偏移量,直接关联播种行距一致性,避免因地轮打滑或导向失效导致种子错位,影响透光率与机械化采收,直线行驶性能尤其对窄行密植模式至关重要。

操纵力试验依据人机工程学标准,测定操纵杆最大操作阻力,确保操控舒适性与精准度,防止作业疲劳或误操作。两项测量分别从机械稳定性与人机适配性切入,既保障农艺要求与作业效率,又提升设备安全性和用户接受度,为优化导航系统、传动结构及操控装置提供关键数据支撑,田间试验作业场景如图 12 所示,试验结果如表 4 所示。



图 12 田间试验作业场景

Fig. 12 Schematic of field experiment operation scenario

表 4 直线行驶性能和操纵装置最大操纵力测量结果

Tab. 4 Measurement results of straight-line driving performance and maximum operating force of control device

项目		数值
变速杆最大操纵力/N	1 挡	132
	2 挡	168
	3 挡	183
每 100 m 跑偏量/m		4.71

操纵装置最大操纵力测量结果为 183 N(3 挡),小于 230 N 标准要求(GB/T 20341—2016《农业拖拉机和自走式机械 操作者操纵装置 操纵力、操纵方向、操纵位置和方法》),整机每 100 m 跑偏量为 4.71 m,满足小于 6 m(GB/T 15370.4—2012《农业拖拉机 通用技术条件 第 4 部分:履带拖拉机》)试验要求,操纵力设计合理,能确保操控舒适性与精准度,可有效防止作业疲劳和误操作,保障播种行直度与操控舒适性。

3.2.2 转向圆和通过圆直径试验

通过测定辣椒直播机最小转向半径,验证其田间机动性与地头转弯能力。通过圆直径测试可估机身结构对已播区域的避让效果,防止转弯碾压导致种子位移或膜面破损,保障播种完整性。试验地块为水平地块,地块宽度为 15 m。

两项测量结合地形与农艺要求,量化验证转向机构匹配度及车身布局合理性,为优化传动比、轮距及转向液压系统提供依据,确保设备在复杂地块中灵活作业的同时维持播种质量,是提升直播机适应性与实用性的关键指标。试验结果如表 5 所示。

表 5 转向圆和通过圆直径测量结果

Tab. 5 Measurement results of steering circle and minimum passage diameters m

类别	参数	数值
左转	辣椒直播机最小转向圆半径	1.40
	辣椒直播机最小通过圆半径	2.24
	辣椒铺管覆膜播种机组最小通过圆半径	2.96
右转	辣椒直播机最小转向圆半径	1.36
	辣椒直播机最小通过圆半径	2.18
	辣椒铺管覆膜播种机组最小通过圆半径	3.03

辣椒直播机最小转向圆半径 1.36 ~ 1.40 m,远低于标准(≤3 m),展现优异的田间机动性,机组最小通过圆半径 2.96 ~ 3.03 m,低于标准(≤4 m),有效减少转弯碾压率,左右转向性能一致,无明显差异,表明转向系统设计合理,转弯碾压率较最小通过圆标准 4 m,下降 15%,可有效减少对已播区域的影响。

良好的转向性能可适应辣椒种植地块狭窄且地形不规则环境,可快速完成地头转弯,减少空转时间,作业效率提高 25%,窄行密植避让效果显著,确保行间种子不受碾压,符合 GB/T 3871.5—2022《农业拖拉机 试验规程 第 5 部分:转向圆和通过圆直径》要求。

3.2.3 牵引功率试验

试验通过测定最大牵引力、滑移率,验证整机动力匹配性。试验模拟典型土壤阻力工况,量化轮胎附着性能与传动链损耗,为优化发动机输出曲线、调整传动比及轮胎选型提供依据,确保牵引效率最大化,降低燃油消耗与耕作成本,是保障作业效果与动力经济性的关键验证环节。

试验路面类型为混凝土,牵引点离地高度 h = 440 mm,燃油温度 16℃,冷却液温度 86℃,润滑油温度 108℃,室外温度 5.3℃,气压 100.2 kPa,相对湿度 30%,试验结果如表 6 所示。

表 6 牵引功率试验结果

Tab. 6 Drawbar power test results

挡位	牵引功率/kW	牵引力/kN	滑移率/%
1 挡	17.53	17.78	14.81
2 挡	18.39	16.80	3.94
3 挡	19.01	12.49	5.48

牵引功率试验测得 1 挡最大牵引力为 17.78 kN，与理论计算值完全吻合，牵引功率与牵引力模型设计合理，试验条件控制精准，传动系统效率假设与实测工况高度一致，验证了设计方案可行性，2 挡滑移率仅 3.94%，表现出优异的轮胎附着性能，3 挡牵引功率最高（19.01 kW），适合田间常规作业。

试验结果表明，该牵引系统在稳态工况下满足设计要求，传动链损耗控制在合理范围内，整机动力匹配性良好，为后续工程应用提供了可靠依据。

3.2.4　动力输出轴（PTO）功率试验

动力输出轴（PTO）试验通过测定扭矩波动、转速稳定性及传动效率，验证其与排种、开沟机构的动力匹配性[23]。动力不均易导致排种断条、种子破损或作业中断，影响播种均匀性。试验模拟负载突变工况，量化轴系振动与温升特性，为优化传动结构、离合缓冲设计提供依据，确保动力持续高效输出，减少能量损耗与部件磨损，是保障直播机作业连贯性与动力系统可靠性的关键验证环节。

试验燃油为国六柴油，发动机最高空载转速 2 353 r/min，动力输出轴变负荷平均燃油消耗率 g_{dp} = 429.4 g/(kW·h)，试验时大气状态：环境温度 16.3 ~ 17.7℃，大气压力 100.3 kPa，相对湿度 30.4% ~ 37.7%，试验时燃油最高温度 33.3℃，冷却液最高温度 89.9℃，进气最高温度 23.9℃，发动机润滑油最高温度 116.2℃，试验结果如表 7 所示。

表 7　动力输出轴（PTO）功率试验结果

Tab.7　Power take-off (PTO) power test results

序号	试验工况	功率/kW	转速/(r·min^{-1})		燃油消耗率	
			输出轴	发动机	G_f/(kg·h^{-1})	g_{ed}/(g·kW^{-1}·h^{-1})
1	最大功率 2 h	30.33	520	1 800	8.73	287.8
2	工况 1：标定转速下最大功率	28.99	635	2 200	9.16	316.0
3	工况 2：工况 1 转矩的 85%	26.26	676	2 342	8.76	333.6
4	工况 3：工况 2 转矩的 75%	19.68	676	2 343	7.88	400.4
5	工况 4：工况 2 转矩的 50%	13.21	678	2 350	6.16	466.3
6	工况 5：工况 2 转矩的 25%	6.61	679	2 352	4.95	748.9
7	工况 6：空载	0.43	679	2 353	3.94	/

注："/"表示怠速状态下，燃油消耗率无实际意义。试验 2 ~ 7 为发动机标定转速下最大功率时变负荷试验。

动力输出轴试验功率 30.33 kW，大于理论计算值 30.30 kW，试验结果表明传动系统设计精度较高，理论假设传动效率大于等于 85%，与实测工况高度吻合。在变负荷条件下，输出轴转速波动小于 2%，满足稳定性要求，最大功率工况下燃油消耗率为 287.8 g/(kW·h)，处于良好水平，在持续 2 h 最大功率工况下，润滑油温度 116.2℃，符合设计要求。

试验结果表明，当前动力匹配方案满足辣椒直播装置作业需求，为后续设计优化提供了可靠依据。

3.2.5　后置三点悬挂装置提升时间试验

试验通过测定悬挂装置从最低位至最高位的提升时间，验证液压系统响应速度与农具避障效率[24]。提升时间过长易导致地形突变时农具触地滞后，引发播种深度不均或机具损坏；过短则液压冲击加剧，影响系统稳定性。试验结果为优化液压管路设计、调整电控策略提供依据，是保障作业连续性与播种质量的关键试验。

试验采用 68 号抗磨液压油，试验时悬挂类别 2N 类，在最高提升位置时立柱倾角 9.0°，液压提升系统安全阀调定压力（18 ± 0.5）MPa，专用框架上加载 10 kN，试验开始时液压油箱温度 66.3℃，环境温度 17.3℃。

当后置三点悬挂装置下悬挂点行程 671 mm，加载点行程 798 mm 时，实测提升时间为 2.36 s，与理论计算值（2.31 s）偏差仅 0.05 s，偏差在 ± 0.2 s 的允许误差范围内，符合国标 GB/T 3871.1—2006《农业拖拉机 试验规程 第 1 部分：通用要求》，试验结果表明液压系统流量匹配性与控制阀响应效率达标，可保障农具在复杂地形中快速避障且升降平顺，有效降低作业中断风险，提高播种作业连续性。

提升时间是评估液压悬挂系统性能的关键指标，直接影响直播机在起伏地形中的作业质量和效率。试验结果验证了液压系统的响应性能满足设计要求，为播种作业提供了可靠保障。

3.2.6　可靠性试验

可靠性试验通过加速寿命试验与故障模式分析，评估直播机在连续作业中的性能衰减与故障率，揭示关键部件（如排种器、传动轴）的耐久性瓶颈[25]。试验模拟高负荷、多循环工况，结合威布尔模型预测平均故障间隔时间（MTBF），定位设计冗余不足或材料疲劳点，避免因突发故障导致播种中断或维护成本激增。结果为优化冗余设计、改进润

滑系统及制定维护周期提供依据,保障设备在长期高负荷作业中的稳定性,降低用户停机风险,是产品寿命与市场口碑的核心验证,试验结果如表 8 所示。

表 8 可靠性试验结果

Tab. 8 Reliability test results

项目	检验结果
累计工作时间/h	240
累计保养时间/h	8.6
机组 1 累计工作时间/h	66.2
机组 1 故障名称	机罩锁无法锁闭
机组 1 故障类别	一般故障
机组 1 故障排除方法	更换锁具
机组 1 故障排除时间/h	0.6
机组 2 累计工作时间/h	87.6
机组 2 故障名称	右侧提升油管接头漏油
机组 2 故障类别	轻微故障
机组 2 故障排除方法	紧固油管接头
机组 2 故障排除时间/h	0.1
机组 3 累计工作时间/h	108.8
机组 3 故障名称	左侧提升油管漏油
机组 3 故障类别	一般故障
机组 3 故障排除方法	更换软管
机组 3 故障排除时间/h	0.5
有效度/%	99.5
平均无故障间隔时间 MTBF/h	120

整机系统可靠性试验测得平均故障间隔时间(MTBF)为 120 h,符合设计要求,验证了基础工况下的运行稳定性。试验中累计故障 3 次,其中一般故障 2 次(占比 66%)、轻微故障 1 次(占比 33%),表现为右侧提升油管接头漏油、机罩锁无法锁闭、左侧提升油管漏油。

数据表明,系统耐久性与冗余设计达标,可满足常规作业负荷。整机有效度达到 99.5%,符合设计要求。

4 结论

(1)研制全履带式辣椒种子直播机关键零部件,采用三阶段无级变速传动系统与模块化耦合架构,整机接地比压小于等于 20 kPa,牵引力达 17.78 kN,有效解决了传统播种机土壤压实高、地形适应性差的问题。田间试验表明,履带行走系统最小转向半径 1.36 m,通过圆半径小于等于 3.03 m,满足麦椒套种模式作业需求。

(2)针对小粒种子精量播种难题,设计了气吸式排种器与鸭嘴滚筒式成穴装置,集成铺管、覆膜、播种多系统协同作业,空穴率小于等于 2%,穴距合格率大于等于 95%,行距 650 ~ 700 mm(可调),显著提升了播种精度与农艺适配性。

(3)液压系统采用 HST 散热与双油缸电液比例闭环控制,提升响应时间 2.36 s,同步误差小于等于 2%。可靠性试验表明,整机平均无故障间隔时间(MTBF)达 120 h,有效度 99.5%,满足规模化种植连续作业需求。

参 考 文 献

[1] 邢颖. 辣椒种植高产技术研究[J]. 南方农机, 2020, 51(16): 71 - 72.
Xing Ying. Study on high-yield technology of pepper cultivation[J]. Southern Agricultural Machinery, 2020, 51(16): 71 - 72. (in Chinese)

[2] 褚泽军,彭思嘉,侯鹏颉,等.我国辣椒主产地特色鲜椒品质评价及加工适宜性分析[J].食品科学,2025,46(20):47 - 56.
Chu Zejun, Peng Sijia, Hou Pengjie, et al. Quality evaluation and processing suitability analysis of specialty fresh peppers from the main origins of chili peppers in China[J]. Food Science, 2025, 46(20): 47 - 56. (in Chinese)

[3] 成璐瑶, 温雅君, 石文婷, 等. QuEChERS 结合 HPLC 检测辣椒及其制品中天然辣椒素、二氢辣椒素和合成辣椒素[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 240 - 247.
Cheng Luyao, Wen Yajun, Shi Wenting, et al. Determination of natural capsaicin, dihydrocapsaicin and synthetic capsaicin in hot pepper and its products by QuEChERS combined with HPLC[J]. Food Science, 2025, 46(2): 240 - 247. (in Chinese)

[4] 李凝, 林蜀云, 刘春波, 等. 贵州山地辣椒生产全程机械化发展现状及对策[J]. 新疆农机化, 2025(1): 52 - 56.
Li Ning, Lin Shuyun, Liu Chunbo, et al. Development status and countermeasures of mountain pepper production mechanization in Guizhou mountainous areas[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2025(1): 52 - 56. (in Chinese)

[5] 侯加林, 张二鹏, 张康博, 等. 基于 DEM - MFBD 的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 46 - 57, 87.
Hou Jialin, Zhang Erpeng, Zhang Kangbo, et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM - MFBD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 46 - 57, 87. (in Chinese)

[6] 周宇杰,侯明鑫,张创鑫,等.丸粒化辣椒种子智能直播机的设计[J].南方农机,2024,55(11):17 - 20.
Zhou Yujie, Hou Mingxin, Zhang Chuangxin, et al. Design of intelligent direct seeder for pelleted pepper seeds[J]. Southern Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 17 - 20. (in Chinese)

[7] 姚腊梅. 气吸式辣椒精量穴直播机设计与试验[D]. 广州:华南农业大学, 2020.
Yao Lamei. Design and experiment of air-suction pepper precision hole direct seeding machine[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[8] 陈斌. 辣椒钵苗移栽机自动供苗装置研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2023.
Chen Bin. Research on automatic seedling supply device of pepper seedling transplanting machine[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[9] 张静, 刘昱, 郑德聪, 等. 丘陵山地拖拉机机身自平衡机构稳定性分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 102 - 108.
Zhang Jing, Liu Yu, Zheng Decong, et al. Stability analysis of self-balancing mechanism for the body of hilly tractors[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 102 - 108. (in Chinese)

[10] Wang Ruochen, Zhang Kaiqiang, Ding Renkai, et al. A novel hydraulic interconnection design and sliding mode synchronization control of leveling system for crawler work machine[J]. Agriculture, 2025, 15(2): 137.

[11] Lee Dong-Hee. The direct voltage control scheme of brushless DC motor for the electric hydrostatic transmission (HST) system [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2025,20(6):4065 - 4076.

[12] Cheng Zhun, Lu Zhixiong. Research on HMCVT parameter design optimization based on the service characteristics of agricultural machinery in the whole life cycle[J]. Machines, 2023, 11(6): 596.

[13] Zhang Junjiang, Feng Ganghui, Yan Xianghai, et al. Cooperative control method considering efficiency and tracking performance for unmanned hybrid tractor based on rotary tillage prediction[J]. Energy, 2024, 288: 129874.

[14] 张振华, 李瑞川, 杨俊茹, 等. 基于 AMESim 拖拉机负载敏感液压提升系统研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 242 - 247.
Zhang Zhenhua, Li Ruichuan, Yang Junru, et al. Research on load-sensitive hydraulic lifting system of tractor based on AMESim[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 242 - 247. (in Chinese)

[15] 崔丹丹, 崔高伟, 张涛. 农机装备电控液压提升系统变权重因子自适应控制研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(9): 115 - 122.
Cui Dandan, Cui Gaowei, Zhang Tao. Research on adaptive variable weight factor of electric control hydraulic lifting system for agricultural machinery equipment[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(9): 115 - 122. (in Chinese)

[16] 郭大方, 陈坤, 胡小安, 等. V 形犁式无沟铺管机牵引力需求[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 46 - 53.
Guo Dafang, Chen Kun, Hu Xiaoan, et al. Tractive force requirement of V-plow drain-pipe installation machine[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(10): 46 - 53. (in Chinese)

[17] 李金拾. 大田蔬菜架拱覆膜机设计[J]. 农机使用与维修, 2024(1): 5 - 9.
Li Jinshi. Design of field vegetable rack arch laminating machine[J]. Agricultural Machinery Use and Maintenance, 2024 (1): 5 - 9. (in Chinese)

[18] 吕金庆, 张璇, 竹筱歆, 等. 大垄双行马铃薯覆膜机关键部件设计与试验[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(8): 88 - 96.
Lv Jinqing, Zhang Xuan, Zhu Xiaoxin, et al. Design and experiment of key components of large monopoly double row pota-to mulching device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(8): 88 - 96. (in Chinese)

[19] 周国超, 徐国栋, 颜发庭. 山地轻便地膜覆膜机的研究与设计[J]. 农业装备技术, 2025, 51(1): 11 - 13.
Zhou Guochao, Xu Guodong, Yan Fating. Research and design of lightweight mountain film-mulching machine[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2025, 51(1): 11 - 13. (in Chinese)

[20] 李运通, 郑娟, 张百祥, 等. 圆盘滑刀式小粒径蔬菜窄行密植播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 197 - 209.
Li Yuntong, Zheng Juan, Zhang Baixiang, et al. Design and testing of disc-sliding knife narrow-row precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 197 - 209. (in Chinese)

[21] 王泉玉, 何进, 卢彩云, 等. 前后双驱双转向玉米播种机器人底盘设计与试验[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 10 - 20.
Wang Quanyu, He Jin, Lu Caiyun, et al. Design and experiment of the maize sowing robot chassis with front and rear dual drive and dual steering[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(4): 10 - 20. (in Chinese)

[22] 袁新. 拖拉机底盘行驶性能优化模型与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(1): 248 - 252.
Yuan Xin. Optimization model and experiment of tractor chassis driving performance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(1): 248 - 252. (in Chinese)

[23] 李宗召. 拖拉机 PTO 负载模拟试验技术研究[D]. 洛阳:河南科技大学, 2022.
Li Zongzhao. Research on PTO load simulation test technology of tractor[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)

[24] 琚孟隆, 琚东升. 拖拉机使用中液压提升器的几种故障及原因简析[J]. 农机使用与维修, 2025(5): 130 - 132.
Ju Menglong, Ju Dongsheng. Comprehensive analysis of hydraulic lift system failures and their causes in tractor operations[J]. Agricultural Machinery Use and Maintenance, 2025(5): 130 - 132. (in Chinese)

[25] 孟繁锃, 金虎成, 陈祥峰. 拖拉机可靠性试验方法探讨[J]. 农机使用与维修, 2012(3): 43.
Meng Fanzeng, Jin Hucheng, Chen Xiangfeng. Discussion on tractor reliability test method[J]. Agricultural Machinery Use and Maintenance, 2012(3): 43. (in Chinese)