

轻简型稻麦收获机电动智能底盘设计与试验

刘浩鲁¹ 沈成¹ 曹光乔¹ 胡良龙¹ 李尚昆¹ 丁小兵² 赵立军³ 胡德龙⁴

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 重庆鑫源农机股份有限公司, 重庆 401329;

3. 重庆文理学院智能制造工程学院, 重庆 402160; 4. 江苏农林职业技术学院农学院园艺学院, 句容 212400)

摘要: 丘陵山区是我国重要的粮食生产基地, 针对该地区农田地块面积小、坡度大和道路窄等特点, 本文设计了一种适用于轻简型稻麦收获机作业的电动智能底盘, 采用分布式电驱动设计实现灵活转向, 采用宽履带设计适应丘陵山区水稻机收作业, 开展了运动工况分析, 完成了电驱系统与电池系统参数设计, 解决了燃油动力底盘响应慢的问题; 开展了运动控制系统软硬件设计, 实现了底盘遥控操作和自主导航。开展了性能测试试验和作业参数优化试验, 以收获速度、脱粒滚筒转速、清选风机转速为试验因素, 破碎率、含杂率、损失率为评价指标, 设计 Box - Behnken 试验并进行方差分析, 建立了评价指标与试验因素的回归模型, 以破碎率、含杂率、损失率最小为寻优目标, 对试验因素进行寻优求解, 获得最优工作参数组合: 收获机收获速度为 0.8 m/s、脱粒滚筒转速为 1000 r/min、清选风机转速为 2786.15 r/min。田间试验结果表明, 最优参数组合下破碎率为 0.42%、含杂率为 4.05%、损失率为 0.87%, 作业期间整机运行平稳, 作业指标基本符合稻麦机械化收获标准, 设计的电动智能底盘能满足收获机作业需求。

关键词: 稻麦收获机; 电动智能底盘; 分布式电驱动; 油电混动; 丘陵山区

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)12-0078-09

OSID:



Design and Experiment of Light and Simple Rice - Wheat Harvesters' Electric Intelligent Chassis

LIU Haolu¹ SHEN Cheng¹ CAO Guangqiao¹ HU Lianglong¹ LI Shangkun¹ DING Xiaobing²
ZHAO Lijun³ HU Delong⁴

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

2. Chongqing Shineray Agricultural Machinery Co., Ltd., Chongqing 401329, China

3. College of Intelligent and Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China

4. Department of Agronomy and Horticulture, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China)

Abstract: Hilly and mountainous areas are important grain production bases in China. The farmlands in these regions are characterized by small plot sizes, steep slopes, and narrow roads. Traditional fuel-driven chassis have disadvantages such as slow power response, inflexible steering, and low levels of intelligence. To address these issues, an electric intelligent chassis suitable for light and simple rice and wheat harvesters was designed. This machine adopted a distributed design to achieve flexible steering and a wide track design to adapt to rice harvesting operations in hilly and mountainous areas. Motion condition analysis was conducted, and the parameter design of the electric drive system and battery system was completed, solving the problem of slow power response of fuel-powered chassis. The software and hardware design of the motion control system was carried out, enabling remote control operation or autonomous navigation of the chassis. Performance tests and operation parameter optimization tests were conducted. Taking the harvesting speed, threshing drum speed, and cleaning fan speed as test factors, and the breakage rate, impurity rate, and loss rate as evaluation indicators, a Box - Behnken test was designed. The results of the Box - Behnken test were analyzed by variance, and a regression model between the evaluation indicators and the test factors was established. With the goal of minimizing the

收稿日期: 2025-03-06 修回日期: 2025-03-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52272438)和国家重点研发计划项目(2023YFD2000301, 2023YFD2000303)

作者简介: 刘浩鲁(1993—), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事农机装备电动化与智能化研究, E-mail: liuhaolu@caas.cn

通信作者: 沈成(1989—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事农机装备电动化与智能化研究, E-mail: shencheng@caas.cn

breakage rate, impurity rate, and loss rate, the optimal solution for the harvesting speed, threshing drum speed, and cleaning fan speed was obtained: the harvester's harvesting speed was 0.8 m/s, the threshing drum speed was 1 000 r/min, and the cleaning fan speed was 2 786.15 r/min. Field tests showed that under this condition, the breakage rate was 0.42%, the impurity rate was 4.05%, and the loss rate was 0.87%. The machine operated smoothly during the operation period, and the operation indicators met the standards for mechanized rice and wheat harvesting. The test results indicated that the designed electric intelligent chassis could meet the operational requirements of the harvester.

Key words: rice - wheat harvester; electric intelligent chassis; distributed electric drive; hybrid oil - electric; hilly and mountainous areas

0 引言

丘陵山区占中国国土面积的 50% 以上,是重要的粮食生产区域^[1]。然而,丘陵山区受地理因素制约,农业生产条件较差,难以开展大规模种植和机械化作业^[2-3]。中国丘陵山区农业机械化仍处于较低水平^[4-5],严重制约了中国在城市化和人口老龄化背景下的农业发展和粮食安全^[6-7]。因此,丘陵山区农业机械化刻不容缓^[8]。

中国丘陵山区耕地面积普遍较小^[9],较大耕地面积为 0.20 ~ 0.33 hm²,较小耕地面积仅为十几平方米。土地破碎化给农作物机械化收获带来了许多困难。曹光乔等^[10]的研究表明,山区零碎耕地主要影响收获机转向效率,因此有必要优化和提高收获机转向性能以适应山区零散的耕地。XIE 等^[11]设计了一种适用于狭窄地块的拱腰式底盘,具有较强地面适应性与良好转向机动性。HU 等^[12]开发了一种基于负载敏感原理和比例-积分-微分(PID)控制算法的多模式液压转向系统,以提高农业机械在丘陵山区的转向灵活性。吕小荣等^[13]为解决土地破碎化带来的问题,设计了一种小型多功能底盘液压系统,实现无级变速和枢轴转向。针对小型谷物收获机在丘陵作业时倾斜角度大、通过性差等问题,雷小龙等^[14]设计了一种谷物联合收获机底盘自动升降液压系统。上述研究所涉及的农机装备主要采用燃油动力驱动液压系统,缺少电动农机研究。电动农机具有动力响应速度快、传动简单、转向灵活的特点^[15-16],十分适合在中小地块使用^[17],也更易于实现智能控制^[18-19]。陈凤等^[20]设计了一种适用于设施园艺的四轮轮毂电机驱动移动平台,并提出了一种自适应防滑控制策略。崔志超等^[21]设计了一种用于温室的电动作业平台,能够满足温室内果蔬管理、采摘及搬运需求。王宝超等^[22]设计了一台适用于温室的增程式电动履带拖拉机。王元杰等^[23]提出了一种电动机无级调速与变速箱调速相结合的调速方法,以实现良好的转速-转矩特性。赵立军等^[24]设计了一种山地电动履带底盘,并开展了底盘

爬坡、越障等性能仿真测试。王家博等^[25]提出了改进抗差自适应扩展卡尔曼滤波法,用于履带式电动微耕机自主导航。LUO 等^[26]提出了一种基于学习的后轮独立驱动电动拖拉机翻耕过程偏航稳定性的双层控制方法。李贤哲等^[27]提出了一种基于多岛遗传算法的分布式驱动系统参数优化设计与验证方法。针对温室电动拖拉机旋耕作业响应性差、耕深不稳定和功率突变等问题,杨杭旭等^[28]提出了基于时间序列分析的角度预测方法,实现了前馈 PID 控制优化。LUO 等^[29]提出了一种基于地形参数识别的电动拖拉机驱动节能控制策略。CHEN 等^[30]设计了一种电驱移动平台,并提出了旋耕机横向耦合动力学模型,提高了旋耕机升降作业过程中的偏航稳定性。

综上,电动农机研究应用场景主要集中在设施园艺环境,机型主要为运载机械和动力机械,受电池续航等问题限制,缺少应用于丘陵山区主粮收获作业的相关研究。电动底盘动力响应速度快,特别适合丘陵山区等狭小地块作业,因此,本研究设计一种适用于丘陵山区稻麦收获机作业的电动智能底盘,将其搭载至 4LZ-1.0LC 型稻麦收获机。分析常见工况,对电动底盘动力电池、电驱动部件和电动底盘等关键部件进行参数设计,进行运动控制器软硬件设计,通过试验验证该收获机作业性能,并利用响应面法获得最佳运行参数。

1 总体方案

采用油电混合动力形式,作业部件由内燃机提供动力,行走底盘采取分布式电驱动,系统架构如图 1 所示,主要包括作业部件、内燃机、动力电池、电控单元、电驱部件和履带底盘。

整机实物如图 2 所示,其中外形尺寸为 3.1 m × 1.5 m × 1.7 m。割台是收获机主要作业部件,割幅为 1.1 m,喂入量为 1 kg/s。动力电池位于履带底盘与脱粒清选部件之间,处于整机中后部,防止转场过程中因碰撞引起安全事故。内燃机位于整机中部,保持配重平衡,防止重心偏移导致歪斜、倾覆等问

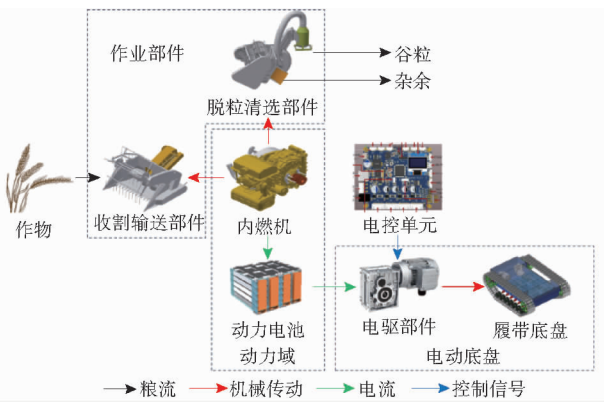


图1 轻简型电动稻麦收获机系统架构示意图

Fig.1 Schematic of system architecture of light and simple electric rice and wheat harvester



图2 轻简型电动稻麦收获机实物图

Fig.2 Light and simple electric rice and wheat harvester physical picture

题,增强机具通过性。动力电池是行走底盘的能量源,为履带两侧的驱动电机供电,驱动电机通过减速箱与底盘驱动轮连接,驱动底盘行驶;柴油发动机为作业机构提供动力,通过链传动、带传动驱动收获输送部件和脱粒清选部件工作,当动力电池电量较低时,作为增程器为动力电池补充电量;电控单元作为运动控制器,接入遥控信号或智能作业系统信号,控制驱动部件动作。

2 关键部件设计

2.1 工况分析

工况主要包括爬坡越障、收获作业和转场3种,爬坡越障速度为0.5 m/s,收获作业速度为0.9 m/s,转场速度为1.3 m/s,相应于驱动轮爬坡转速为54 r/min,收获作业转速为94 r/min,转场转速为125 r/min。参照文献[31],开展设计研究。

2.1.1 转场工况

转场工况时,收获机主要受摩擦力影响,忽略空气阻力和加速阻力,驱动电机提供的功率应大于克服摩擦力所做的功率,故转场工况所需功率为

$$P_1 = \frac{v_1 F_{f1}}{1000 \eta_m \eta_h} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad F_{f1} = \mu_h m_h g \quad (2)$$

式中 P_1 ——转场所需总功率,kW
 v_1 ——转场时速度,m/s
 F_{f1} ——转场过程所受摩擦力,N
 μ_h ——摩擦因数,取0.3~0.5
 η_m ——电机效率,取0.85
 η_h ——整机效率,取0.9
 m_h ——整机质量,取800 kg
 g ——重力加速度,m/s²

由式(1)、(2)可得转场时所需功率为4.08~6.8 kW。

转场工况启动时,驱动电机提供的功率应大于克服摩擦力和提供加速度所做的功率,启动所需功率 P'_1 为

$$P'_1 = \frac{v'_1 F_{f1} + m_h a}{1000 \eta_m \eta_h} \quad (3)$$

式中 v'_1 ——转场时瞬时速度,m/s
 a ——加速度,取1 m/s²

由式(3)可得转场启动时所需功率为5.13~7.85 kW。

2.1.2 爬坡工况

爬坡工况时,主要进行行走作业,收获机速度较低,主要受地面摩擦力和重力沿斜坡方向分力影响,忽略空气阻力和加速阻力,驱动电机提供的功率应大于克服摩擦力所做的功率,故爬坡工况所需功率为

$$P_2 = \frac{v_2 F_{f2}}{1000 \eta_m \eta_h} \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad F_{f2} = (\mu_h \cos\theta + \sin\theta) m_h g \quad (5)$$

式中 P_2 ——爬坡所需总功率,kW

v_2 ——爬坡时速度,m/s

F_{f2} ——爬坡过程中所受阻力,N

θ ——爬坡角度,取极端工况25°

由式(4)、(5)可得爬坡时所需功率为3.63~4.58 kW。

爬坡工况启动时,驱动电机提供的功率应大于克服摩擦力、重力沿斜坡方向分力和提供加速度所做的功率,启动所需功率为

$$P'_2 = \frac{v'_2 F_{f2} + m_h a}{1000 \eta_m \eta_h} \quad (6)$$

式中 v'_2 ——爬坡时瞬时速度,m/s

由式(6)可得爬坡启动时所需功率为4.68~5.63 kW。

2.1.3 收获工况

收获工况时,收获机主要受地面摩擦力影响,忽略空气阻力和加速阻力,驱动电机提供的功率应大于克服摩擦力所做的功率,故收获工况所需功率为

$$P_3 = \frac{v_3 F_{\beta}}{1\,000 \eta_m \eta_h} \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad F_{\beta} = \mu_h m_h g \quad (8)$$

式中 P_3 ——收获所需总功率, kW

v_3 ——收获时速度, m/s

F_{β} ——收获过程中所受阻力, N

由式(7)、(8)可得收获时所需功率为 2.83 ~ 4.71 kW。

收获工况启动时, 驱动电机提供的功率应大于克服摩擦力和提供加速度所做的功率, 启动所需功率为

$$P'_3 = \frac{v'_3 F_{\beta} + m_h a}{1\,000 \eta_m \eta_h} \quad (9)$$

式中 v'_3 ——收获时瞬时速度, m/s

由式(9)可得收获启动时所需功率为 3.88 ~ 5.76 kW。

2.2 电动机参数选型与电驱部件设计

稻麦收获机作业工况复杂, 底盘行驶时土壤粘重, 地面平整度较差, 负载多变, 瞬时扭矩输出要求高。无刷直流电机具有过载能力强、起动转矩大、效率高和功率密度大的优点, 适宜电动农机作业特点和环境, 选择无刷直流电机作为主驱动电机。通过分析 3 种工况下受力, 电机额定功率应满足最大功率工况所需功率的 1.1 ~ 1.6 倍, 电机额定功率 P_N 与峰值功率 P_{Nmax} 为

$$P_N \geq (1.1 \sim 1.6) P_1 \quad (10)$$

$$P_{Nmax} \geq (1.5 \sim 2.0) P_N \quad (11)$$

由式(10)、(11), 驱动电机选用 2 台 72 V、4 kW 无刷直流电机。

为适应电动农机行走作业低速高扭矩的动力输出特点, 需使用减速机实现降速增扭, 电动机最大输出转矩为

$$T_{max} = \frac{9\,550 P_{Nmax}}{n} \quad (12)$$

式中 T_{max} ——电机最大输出转矩, N·m

n ——电机转速, r/min

考虑机械结构设计, 由式(12), 匹配传动比为 40 的斜齿准双曲面齿轮减速器, 电驱动部件如图 3 所示。

2.3 动力电池参数选型

考虑田间复杂环境, 为保障续航和安全性, 选择三元锂电池作为动力电池。根据电机母线工作电压和作业最大功率确定动力电池容量, 计算式为

$$C_b = \frac{1\,000 P_1}{U_m h_k \eta_{mC}} \quad (13)$$

式中 C_b ——动力电池容量, A·h

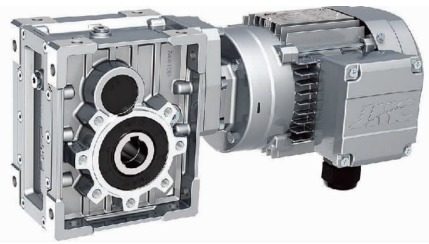


图 3 电驱动部件实物图

Fig. 3 Physical drawing of electric drive components

U_m ——电机母线电压, V

h_k ——锂电池放电深度, 取 0.8

η_{mC} ——电机控制器和电动机效率乘积, 取 0.8

由式(13), 电池部分选用 72 V、200 A·h 规格三元锂电池。BMS 电源管理系统能实现过流保护、过压保护、短路保护、平衡保护、过冲保护、过放保护、过热保护和充电保护。

2.4 履带式电动底盘设计

丘陵山区地形复杂, 坡高沟深, 土壤黏重, 地块破碎, 对底盘通过性和转向灵活性要求较高, 因此选择宽履带结构和分布式电驱动设计, 底盘结构示意图如图 4 所示。整体结构由 1 对驱动轮、1 对导向轮、1 对张紧轮、5 对负重轮、支撑架和橡胶履带构成, 两侧驱动轮分别由两侧的驱动电机联结减速机驱动。

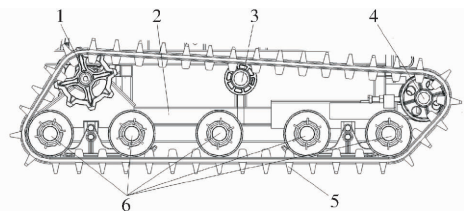


图 4 底盘结构示意图

Fig. 4 Schematic of chassis structure

1. 驱动轮 2. 支撑架 3. 张紧轮 4. 导向轮 5. 履带 6. 负重轮

履带节距 t_p 为

$$t_p = (15.0 \sim 17.5) \sqrt[4]{m_h} \quad (14)$$

履带宽度 b 与履带接地长度 L 配合可提高底盘牵引附着性能。窄长履带滚动阻力小, 牵引附着性能好, 但转向阻力矩较大, 为适应丘陵山区水稻机收作业的土壤质地条件, 减少接地比压, 提高转向灵活性, 采取宽履带设计, b/L 取 0.3。底盘主要技术指标如表 1 所示。

表 1 底盘主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of chassis

参数	履带节距/ mm	履带节数	履带宽度/ mm	轨距/ mm	最大爬坡度/ (°)	跨沟宽度/ mm	越障高度/ mm
数值	79	41	360	690	25	450	215

2.5 运动控制系统设计

履带动力底盘主要由履带、驱动轮、导向轮、托带轮和支重轮构成。整机行驶和转向由电机驱动履带底盘驱动轮实现,两侧驱动轮分别由两侧电机独立驱动,通过控制两侧电机转速实现差速转向,运动控制系统硬件选型及参数如表2所示。

表2 运动控制系统硬件选型及参数

Tab.2 Hardware selection and parameters of motion control system

部件名称	选型及参数
运动控制器	stm32F405
电机驱动器	Flipsky FSESC 75100 With Aluminum PCB
工控机	研华嵌入式工控机 ARK 8500U
自主导航系统	上海华测 CGI-430 型导航系统: IMU-RTK-BDS 组合导航
遥控系统	云卓-H12;通道数12,频段2.400~2.483 GHz

在底盘运动控制中,自主导航系统或人工遥控向运动控制器输入加速度信息 a 和转向角度信息 δ ,运动控制器调整两侧电机转速信号 n 并输出转矩信号 T ,实现整机运动控制,底盘运动控制结构框图如图5所示。

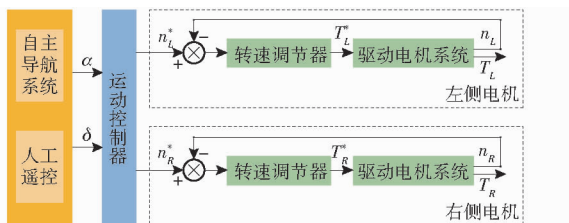


图5 底盘运动控制结构框图

Fig.5 Block diagram of chassis motion control structure

人工遥控操作时,通过2个遥控手杆分别控制速度和转角信号,速度解析函数为

$$v = \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{\max} - \alpha_0} v_{\max} \quad (\alpha \in (\alpha_0, \alpha_{\max})) \quad (15)$$

式中 v_{\max} ——整机最大行驶速度, m/s

α ——速度遥控手杆行程

α_0 ——速度遥控手杆最小行程

α_{\max} ——速度遥控手杆最大行程

转向信号解析函数为

$$\delta = \frac{\beta - \beta_0}{\beta_{\max} - \beta_0} \pi \quad (\beta \in (\beta_0, \beta_{\max})) \quad (16)$$

式中 β ——转向角度手杆行程

β_0 ——转向角度遥控手杆最小行程

β_{\max} ——转向角度遥控手杆最大行程

构建阿克曼转向模型,实现收获机电差速转向,如图6所示。

当收获机绕点 O 运动时,有

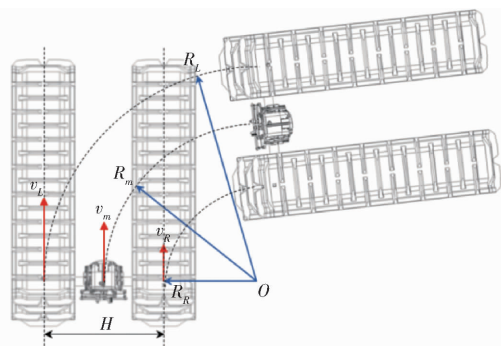


图6 电子差速转向运动轨迹图

Fig.6 Electronic differential steering trajectory diagram

$$\omega = \frac{v_R}{R_m - \frac{H}{2}} = \frac{v_L}{R_m + \frac{H}{2}} = \frac{v_m}{R_m} \quad (17)$$

式中 v_L ——左侧履带驱动轮线速度, m/s

v_R ——右侧履带驱动轮线速度, m/s

ω ——转向角速度, rad/s

v_m ——转向速度, m/s

H ——两侧履带间轨距, m

R_m ——中心运动半径, m

根据式(17),给出差速模型逆运动学数学推导,得到

$$v_L = \left(R_m + \frac{H}{2} \right) \omega \quad (18)$$

$$v_R = \left(R_m - \frac{H}{2} \right) \omega \quad (19)$$

$$R_m = \frac{v_m}{\omega} \quad (20)$$

$$C = \frac{1}{R_m} \quad (21)$$

式中 C ——曲率,用于大曲率路径的前馈补偿

当左右履带以大小相等、方向相反的速度运动时,可以实现收获机原地转向,轨迹如图7所示。

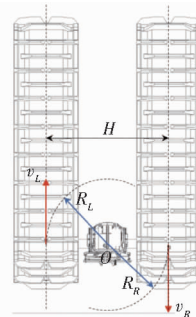


图7 原地转向运动轨迹图

Fig.7 In-situ steering motion trajectory diagram

3 作业试验

为验证轻简型电动稻麦收获机行走、作业各项性能,分别在江苏省句容市、江苏省扬州市和重庆市江津区开展了水稻/小麦收获试验共计3次,田间试

验信息如表 3 所示。

表 3 田间试验信息
Tab.3 Field trial information

序号	试验信息
1	试验地点:江苏省句容市边城镇大华村
	试验时间:2023 年 12 月 7 日
	试验品种:沪软 1818 水稻
	试验面积:0.33 hm ²
2	试验地点:江苏省扬州市张洪程院士创新试验基地
	试验时间:2024 年 6 月 1 日
	试验品种:扬麦 33 小麦
	试验面积:0.14 hm ²
3	试验地点:重庆市江津区四屏镇旺龙村
	试验时间:2024 年 9 月 1 日
	试验品种:神农 128 水稻
	试验面积:0.19 hm ²

3.1 试验方法

按照 GB/T 8097—2008《收割机械 联合收获机试验方法》并参考 GB/T 2828.1—2012《计数抽样检测程序》进行。每次试验划定 5 份 $25\text{ m} \times 1\text{ m}$ 等份试验区,试验时收获机以前进速度 0.9 m/s 、割幅 1 m 满幅作业。接取试验行程内出粮口排出物不少于 $1\ 000\text{ g}$ 的小样,并按照五点取样法测定作业后试验区每平方米掉落稻麦籽粒,使用清洁样品袋装袋编号,并测定作业机破碎率、含杂率和损失率。多次作业完成后使用精度 0.001 g 电子秤测量,结果取平均值。

破碎率 p 、含杂率 z 和损失率 s 计算公式为

$$\begin{cases} p = \frac{m_p}{m} \times 100\% \\ z = \frac{m_z}{m} \times 100\% \\ s = \frac{m_s}{m} \times 100\% \end{cases} \quad (22)$$

式中 m ——总质量

m_p ——破碎质量

m_z ——含杂质量

m_s ——损失质量

根据前期预试验结果确定作业参数范围,以收获速度(v)、脱粒滚筒转速(n_1)和清选风机转速(n_2)为自变量,以破碎率(Y_1)、含杂率(Y_2)和损失率(Y_3)为响应值,依照 Box - Behnken 试验设计原理,采用三因素三水平响应面分析方法,分别建立各因素与脱净率、总损失率和籽粒含杂率间的数学模型,并对各因素及其交互作用进行分析,各试验因素编码如表 4 所示。分别实施 17 组响应面分析试验,试验结果如表 5 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 为试验因素编

表 4 试验因素编码

Tab.4 Coding of test factors

编码	因素		
	收获速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	脱粒滚筒转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	清选风机转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
-1	0.8	1 000	2 500
0	0.9	1 200	2 800
1	1.0	1 400	3 100

表 5 试验设计与结果

Tab.5 Experimental design and results

试验号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
	X_1	X_2	X_3			
1	0	0	0	0.42	4.6	0.88
2	1	1	0	0.48	4.1	0.93
3	0	0	0	0.43	4.5	0.89
4	1	0	-1	0.42	4.9	0.84
5	-1	-1	0	0.35	3.9	0.84
6	0	-1	1	0.35	3.7	0.96
7	-1	0	-1	0.41	4.7	0.83
8	0	0	0	0.44	4.5	0.89
9	-1	0	1	0.40	3.7	0.95
10	-1	1	0	0.47	3.8	0.93
11	0	1	1	0.49	3.6	0.97
12	1	0	1	0.41	3.9	0.96
13	0	0	0	0.43	4.5	0.88
14	0	-1	-1	0.36	4.9	0.82
15	0	1	-1	0.47	4.8	0.92
16	0	0	0	0.44	4.4	0.87
17	1	-1	0	0.37	4.2	0.92

码值。应用 Design-Expert 12.0 软件进行数据处理分析。

3.2 回归模型与分析

根据表 5 试验结果,对破碎率(Y_1)、含杂率(Y_2)和损失率(Y_3)进行回归模型方差分析,结果如表 6 所示,剔除不显著项后 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 二次回归模型为

$$Y_1 = 0.432 + 0.006 2X_1 + 0.06X_2 - 0.001 2X_3 - 0.011X_1^2 - 0.011X_3^2 \quad (23)$$

$$Y_2 = 4.5 + 0.125X_1 - 0.05X_2 - 0.55X_3 - 0.225X_1^2 - 0.275X_2^2 \quad (24)$$

$$Y_3 = 0.882 + 0.012 5X_1 + 0.026 3X_2 - 0.053 75X_3 - 0.02X_1X_2 - 0.022 5X_2X_3 + 0.022 7X_3^2 \quad (25)$$

由表 6 可知,破碎率、含杂率和损失率二次回归模型 $P < 0.000 1$,表明回归模型极显著,失拟项 $P > 0.05$,失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合。交互因素对损失率的影响如图 8 所示。

表6 回归方程方差分析

Tab.6 Regression equation analysis of variance

试验指标	变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
破碎率	模型	0.030 5	9	0.003 4	52.21	<0.000 1 **
	X_1	0.000 3	1	0.000 3	4.81	0.064 4
	X_2	0.028 8	1	0.028 8	443.08	<0.000 1 **
	X_3	0.000 0	1	0.000 0	0.192 3	0.674 2
	X_1X_2	0.000 0	1	0.000 0	0.384 6	0.554 8
	X_1X_3	0.000 0	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
	X_2X_3	0.000 2	1	0.000 2	3.46	0.105 1
	X_1^2	0.000 5	1	0.000 5	7.84	0.026 5 *
	X_2^2	0.000 1	1	0.000 1	0.793 5	0.402 6
	X_3^2	0.000 5	1	0.000 5	7.84	0.026 5 *
	残差	0.000 5	7	0.000 1		
	失拟	0.000 2	3	0.000 1	0.833 3	0.541 3
	误差	0.000 3	4	0.000 1		
	总和	0.031 0	16			
含杂率	模型	3.13	9	0.347 3	54.02	<0.000 1 **
	X_1	0.125	1	0.125	19.44	0.003 1 **
	X_2	0.02	1	0.02	3.11	0.121 1
	X_3	2.42	1	2.42	376.44	<0.000 1 **
	X_1X_2	0	1	0	0	1.000 0
	X_1X_3	0	1	0	0	1.000 0
	X_2X_3	0	1	0	0	1.000 0
	X_1^2	0.213 2	1	0.213 2	33.16	0.000 7 **
	X_2^2	0.318 4	1	0.318 4	49.53	0.000 2 **
	X_3^2	0.002 6	1	0.002 6	0.409 4	0.542 7
	残差	0.045	7	0.006 4		
	失拟	0.025	3	0.008 3	1.67	0.309 9
	误差	0.02	4	0.005		
	总和	3.17	16			
损失率	模型	0.036 5	9	0.004 1	26.92	0.000 1 **
	X_1	0.001 3	1	0.001 3	8.29	0.023 7 *
	X_2	0.005 5	1	0.005 5	36.58	0.000 5 **
	X_3	0.023 1	1	0.023 1	153.35	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.001 6	1	0.001 6	10.62	0.013 9 *
	X_1X_3	0	1	0	0	1.000 0
	X_2X_3	0.002	1	0.002	13.44	0.008 0 **
	X_1^2	2.63×10^{-7}	1	2.63×10^{-7}	0.001 7	0.967 8
	X_2^2	0.002 2	1	0.002 2	14.46	0.006 7 **
	X_3^2	0.000 7	1	0.000 7	4.54	0.070 6
	残差	0.001 1	7	0.000 2		
	失拟	0.000 8	3	0.000 3	3.69	0.119 7
	误差	0.000 3	4	0.000 1		
	总和	0.037 6	16			

注: **表示差异极显著($P < 0.01$); *表示差异显著($0.01 \leq P < 0.05$)。

3.3 最优工作参数确定与试验验证

根据二次回归模型结果与响应面分析,为进一步提升轻筒型电动稻麦收获机作业性能,以破碎率(Y_1)、含杂率(Y_2)和损失率(Y_3)最小为优化指标,

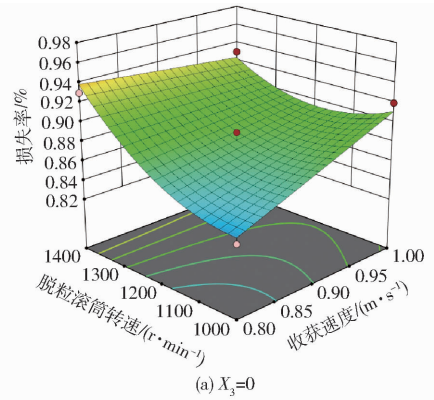
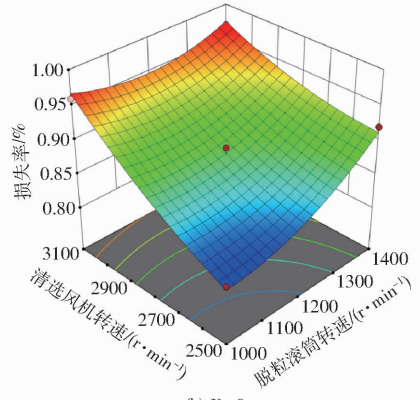
(a) $X_3=0$ (b) $X_1=0$

图8 交互因素对损失率的影响

Fig.8 Influence of interaction factors on loss rate

在各试验因素水平约束条件下,建立性能指标全因子二次回归方程,确定目标优化值与最优工作参数模型。目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

最终得到优化试验指标破碎率为0.34%、含杂率为3.95%、损失率为0.84%;最优工作参数为收获速度0.8 m/s、脱粒滚筒转速1000 r/min、清选风机转速2786.15 r/min。

按照最优工作参数开展田间试验验证,作业期间整机运行平稳,破损率为0.42%,含杂率为4.05%,损失率为0.87%。

3.4 作业成本核算

按照柴油7元/L、农业用电0.4元/度计算,传统燃油型稻麦收获机燃油消耗23.55 L/hm²,作业成本为165元/hm²,采用电动底盘后,燃油消耗为14.1 L/hm²,耗电量29.25 kW·h/hm²,作业成本110.4元/hm²,较燃油型收获机,稻麦收获机节约作业成本约1/3。

4 结论

(1) 面向丘陵山区地形环境下稻麦收获作业需求,基于 4LZ-1.0LC 型稻麦收获机,改进设计了一款分布式电动智能底盘,开展了典型工况条件下的动力学分析,完成电池和电驱系统选型设计。行走驱动系统采用了分布式电驱动履带底盘,采用无刷直流电机+减速机组合实现低速大扭矩动力输出。为提升收获机运动控制精度,满足多样化控制需求,

提供了自主导航系统和人工遥控操作 2 种运动控制模式,完成运动控制系统软硬件设计。

(2) 开展了作业性能优化试验,以收获速度、清选风机转速、脱粒滚筒转速为试验因素,破碎率、含杂率和损失率为评价指标,探究试验因素对作业质量的影响规律,结果表明当收获机收获速度为 0.8 m/s、脱粒滚筒转速为 1 000 r/min、清选风机转速为 2 786.15 r/min 时,破碎率为 0.42%、含杂率为 4.05%、损失率为 0.87%,基本符合稻麦机械化收获要求。

参 考 文 献

- [1] LUO F. Effects of agricultural geographical agglomeration on agricultural mechanization technology progress an empirical study based on hilly and mountain areas[J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(3): 193-200.
- [2] WANG X, YUAN S, JIA W. Current situation and development of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2022, 40(5): 535-540.
- [3] 刘光盛,赵乐松,程迎轩,等.基于限制因子的粤北丘陵山区耕地宜机化整治分区[J].*农业工程学报*,2021,37(12): 262-270.
LIU Guangsheng, ZHAO Lesong, CHENG Yingxuan, et al. Land consolidation zoning of Northern Guangdong for suitable mechanization transformation in hilly and mountainous areas based on limiting factors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(12): 262-270. (in Chinese)
- [4] CUI S, JIN X, CAO G. Study on the factors affecting the level of agricultural mechanization and regional division in hilly and mountainous areas of China—based on 238 counties (cities) investigations in hilly and mountainous areas[J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(11): 129-134.
- [5] 吴萍,曹光乔.韩国农田整治对我国丘陵山区宜机化改造借鉴与启示[J].*中国农机化学报*,2022,43(9):158-164.
WU Ping, CAO Guangqiao. Reference and enlightenment of farmland and construction in South Korea to the farmland mechanized construction in hilly and mountainous areas of China[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(9): 158-164. (in Chinese)
- [6] DENG X, LIAN P P, ZENG M, et al. Does farmland abandonment harm agricultural productivity in hilly and mountainous areas? Evidence from China[J]. *Journal of Land Use Science*, 2021, 16(4): 433-449.
- [7] XU D, DENG X, HUANG K, et al. Relationships between labor migration and cropland abandonment in rural China from the perspective of village types[J]. *Land Use Policy*, 2019, 88: 104164.
- [8] 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)
- [9] 邓瑶,信桂新,王军,等.丘陵山区土地细碎化治理综合评价[J].*西南大学学报(自然科学版)*,2017,39(3):157-163.
DENG Yao, XIN Guixin, WANG Jun, et al. Comprehensive evaluation of land fragmentation treatment in hilly and mountainous areas[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2017, 39(3): 157-163. (in Chinese)
- [10] 曹光乔,陈聪,梁建,等.山区耕地细碎化对水稻机收效率的影响研究[J].*云南农业大学学报(自然科学)*,2015,30(6): 946-950.
CAO Guangqiao, CHEN Chong, LIANG Jian, et al. Research on the influence of montanic fragmental farmland on the work efficiency of rice harvester[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2015, 30(6): 946-950. (in Chinese)
- [11] XIE X, HAN X, ZHANG Z, et al. Structural design and test of arch waist dynamic chassis for hilly and mountainous areas [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 127(3-4): 1921-1933.
- [12] HU K, ZHANG W. Design and experiment of multi-mode steering system of agricultural machinery for hilly and mountainous area[J/OL]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(7). doi:10.1177/16878140211034827.
- [13] 吕小荣,丁为民,吕小莲.丘陵山区小型多功能底盘液压系统的设计[J].*华中农业大学学报*,2014,33(2):128-132.
LÜ Xiaorong, DING Weimin, LÜ Xiaolian. Design of hydraulic system of small multi-function chassis in hilly area[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33(2): 128-132. (in Chinese)
- [14] 雷小龙,陈宇,李举,等.谷物联合收获机底盘自动升降液压系统设计与试验[J].*智能化农业装备学报(中英文)*,2024, 5(2):9-18.
LEI Xiaolong, CHEN Yu, LI Ju, et al. Design and experiment of chassis automatic lifting hydraulic system for harvester[J].

- Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(2): 9-18. (in Chinese)
- [15] 徐立友, 张俊江, 闫祥海, 等. 农业装备电动化技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 1-12.
XU Liyou, ZHANG Junjiang, YAN Xianghai, et al. Review of research for agricultural equipment electrification technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 1-12. (in Chinese)
- [16] 刘孟楠, 雷生辉, 赵静慧, 等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 348-364.
LIU Mengnan, LEI Shenghui, ZHAO Jinghui, et al. Review of development process and research status of electric tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 348-364. (in Chinese)
- [17] 刘浩鲁, 沈成, 胡良龙, 等. 电动农业装备研究进展与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 39-51.
LIU Haolu, SHEN Cheng, HU Lianglong, et al. Research progress and development trend of electric agricultural equipment [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(23): 39-51. (in Chinese)
- [18] 白学峰, 常江雪, 滕兆丽, 等. 我国智能农业拖拉机关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2022, 3(2): 10-21.
BAI Xuefeng, CHANG Jiangxue, TENG Zhaoli, et al. Research progress on key technologies of intelligent agricultural tractors in China [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2022, 3(2): 10-21. (in Chinese)
- [19] 陈仲举, 谢斌, 罗振豪, 等. 无人驾驶电动拖拉机犁耕机组路径跟踪与耕深模糊控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 491-504.
CHEN Zhongju, XIE Bin, LUO Zhenhao, et al. Fuzzy control strategy for path tracking-tillage depth of unmanned electric tractor ploughing unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 491-504. (in Chinese)
- [20] 陈凤, 丁俊杰, 罗志涛, 等. 设施园艺移动平台分布式驱动自适应防滑控制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 85-96.
CHEN Feng, DING Junjie, LUO Zhitao, et al. Distributed drive adaptive skid control of facility horticulture mobile platform [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(10): 85-96. (in Chinese)
- [21] 崔志超, 管春松, 陈永生, 等. 温室用小型多功能电动履带式作业平台设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 48-57.
CUI Zhichao, GUAN Chunsong, CHEN Yongsheng, et al. Design of small multi-functional electric crawler platform for greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 48-57. (in Chinese)
- [22] 王宝超, 乔明睿, 初香港, 等. 增程式电动履带拖拉机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 431-439.
WANG Baochao, QIAO Mingrui, CHU Xianggang, et al. Design and experiment on extended-range electric caterpillar tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 431-439. (in Chinese)
- [23] 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 controlled electric tractor for greenhouses [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 23-29. (in Chinese)
- [24] 赵立军, 李金广, 杨斌, 等. 山地电动履带底盘设计与仿真分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2024, 51(1): 30-37.
ZHAO Lijun, LI Jinguang, YANG Bin, et al. Design and simulation analysis of mountain electric track chassis [J]. Tractor & Farm Transporter, 2024, 51(1): 30-37. (in Chinese)
- [25] 王家博, 魏文波, 王广阔, 等. 履带式电动微耕机自动驾驶系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 63-72.
WANG Jiabo, WEI Wenbo, WANG Guangkuo, et al. Design and experiment of the automatic navigation system for tracked electric micro tillers [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(23): 63-72. (in Chinese)
- [26] LUO Z H, XIE B, CHEN Z J, et al. Learning-based double layer control method of yaw stability simulation research for rear wheel independent drive electric tractor plowing operation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 109895.
- [27] 李贤哲, 张明柱, 刘孟楠, 等. 基于多岛遗传算法的电动拖拉机分布式驱动系统优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 401-411.
LI Xianzhe, ZHANG Mingzhu, LIU Mengnan, et al. Optimized design and validation of distributed drive system for electric tractor based on multi-island genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 401-411. (in Chinese)
- [28] 杨杭旭, 周俊, 齐泽中, 等. 温室电动拖拉机旋耕稳定性时序分析与前馈PID控制方法研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 412-420.
YANG Hangxu, ZHOU Jun, QI Zezhong, et al. Rotary tillage stability of greenhouse electric tractor based on time series analysis and feedforward PID [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 412-420. (in Chinese)
- [29] LUO Z H, XIE B, TONG Y K, et al. Energy-saving drive control strategy for electric tractors based on terrain parameter identification [J]. Applied Energy, 2024, 376: 124203.
- [30] CHEN F, DING J, LUO Z, et al. A novel robust model predictive controller for improving the steering stability of electric drive mobile platform considering the effect of both yaw motion and rototiller lifting [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 230: 109846.
- [31] 唐忠. 履带式水稻联合收割机(理论、模型、设计)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.