

双螺旋驱动式丘陵山区深泥脚水田插秧机设计与试验

陈行政^{1,2} 周浩^{1,2} 谢守勇^{1,2} 宋幼添^{1,2} 刘凡一^{1,2} 谢晓斌^{1,2}

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 西南农业智能装备创新中心, 重庆 400715)

摘要: 在泥脚深度超过 400 mm 的丘陵山区水田插秧过程中, 插秧机常因陷机而无法作业。为此提出一种双螺旋驱动式深泥脚水田插秧机。首先, 系统分析该插秧机运动原理, 构建整机结构模型和螺旋驱动轮结构参数设计模型; 然后, 分析双螺旋结构对行驶方向和推进力的影响, 并提出驱动电机匹配方法; 在此基础上, 设计整机控制系统并进行样机试制。试验结果表明, 所设计的插秧机在丘陵山区泥脚深度 430 mm 的水田中最大无控直线偏移量为 0.021 m, 满足行业标准, 通过性强、行驶平稳、插秧效果良好。当螺旋驱动轮转速为 1.33 r/s 时, 插秧机行驶速度为 1.02 m/s, 滑转率达到最大值 3.045%。随着泥脚深度的增加, 沉陷量逐渐增加; 且随着螺旋驱动轮转速的增加, 最大沉陷量由 148.67 mm 逐渐减小至 59.74 mm, 表明双螺旋插秧机适应丘陵山区深泥脚水田环境。

关键词: 插秧机; 双螺旋驱动; 深泥脚水田

中图分类号: S 223.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)03-0247-09

OSID:



Rice Transplanter with Double Helix Drive for Deep Muddy Paddy Fields of Hilly Regions

CHEN Xingzheng^{1,2} ZHOU Hao^{1,2} XIE Shouyong^{1,2} SONG Youtian^{1,2} LIU Fanyi^{1,2} XIE Xiaobin^{1,2}

(1. College of Engineering Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

2. Southwest Agricultural Equipment Innovation Center, Chongqing 400715, China)

Abstract: Deep muddy paddy fields are widely spread in southern hilly regions of China. In these paddy fields, the rice transplanter is often trapped due to the poor soil bearing capacity, resulting in unnecessary interruption of rice transplanting or mechanical failure of the rice transplanter. Aiming to address these issues, a novel rice transplanter equipped with double helix drive was proposed. Firstly, the motion principle the proposed rice transplanter was analyzed and its parametric design model was constructed. Then the relationship between propulsion force and parameters of spiral structure as well as the driving direction was modeled. Finally, a prototype of the transplanter was developed and tested under different conditions. From the results of the experiments, it can be found that the proposed rice transplanter had exceptional stability and superior transplanting performance in deep muddy paddy fields. When the rotating speed of the spiral wheel was 1.33 r/s, the working speed of the rice transplanter was 1.02 m/s. As a result, the slip rate of the rice transplanter reached the maximum value of 3.045%. However, the settlement of the rice transplanter was decreased with the increase of speed of spiral wheel. The maximum settlement was decreased significantly from 148.67 mm to 59.74 mm. Furthermore, in fields with a 430 mm mud depth, the transplanter's maximum uncontrolled linear deviation was 0.021 m. Based on the presented work, manufacturers can easily develop a rice transplanter for deep muddy paddy fields in southern hilly regions of China, which would be a useful rice transplant equipment to overcome the unnecessary interruption of rice transplanting or mechanical failure of the rice transplanter.

Key words: rice transplanter; double helix drive; deep muddy paddy fields

收稿日期: 2024-09-03 修回日期: 2024-11-18

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (cstc2021jsex - gksbX0065)

作者简介: 陈行政 (1990—), 男, 副教授, 博士, 主要从事现代农业装备技术研究, E-mail: chenxzh@swu.edu.cn

通信作者: 谢守勇 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能农机装备和机电一体化研究, E-mail: xsyswu@163.com

0 引言

水稻是我国第一大粮食作物,产量占全国粮食总产量的 40%^[1],主要种植在长江中下游平原、东北平原和南方丘陵山区。其中,南方丘陵山区水稻耕地面积占全国三分之一,是我国重要的水稻生产基地^[2]。

然而,由于长期排水不畅、大型轮式拖拉机碾压等原因,南方丘陵山区部分水田泥脚正在逐渐变深,给水稻插秧机作业带来了极大挑战^[3]。现有的轮式插秧机在此环境下容易打滑或陷入泥浆中,导致作业质量低下,甚至部分地区由于深泥脚田陷机问题出现了大面积撂荒^[4],严重危及区域和国家粮食安全。因此,迫切需要针对丘陵山区深泥脚水田开发高效适用插秧机。

目前,一些学者在水稻插秧作业机械方面开展了深入的研究^[5]。例如,在插秧机结构优化设计方面,陈训教等^[6]提出了一种具有升降功能的插秧机辅助行走机构,通过使浮板脱离泥面,减少了插秧机的转向阻力。朱德泉等^[7]针对水稻插秧行距变化需求,设计一种可调宽窄行的 2ZGK-6 型高速水稻插秧机,以适应不同的种植条件。马旭等^[8]基于水稻高速插秧机设计了一种颗粒肥变量控制施肥装置,并构建了施肥量在线监测和智能调控系统,实现了高精度、高稳定性高速插秧和同步施肥作业。许春林等^[9]设计了一种切膜开孔和分秧栽植协同的膜上插秧机分插机构,通过运动学分析和仿真优化,对分插机构结构参数和轨迹进行了优化,并通过土槽试验验证了其有效性和可行性。

为降低插秧机操作强度,一些学者开始关注插秧机自动驾驶问题。马悦琦等^[10]提出了一种自动驾驶插秧机控制器误差权重矩阵实时调整方法,用以提高插秧机转向时的曲线路径跟踪精度。迟瑞娟等^[11]通过构建插秧机运动学模型提出了一种插秧机路径跟踪控制方法,并通过仿真和试验证明了其在直线和曲线路径跟踪中的有效性。何杰等^[12-13]设计了一种基于 PID 的插秧机电动方向盘转向控制算法,并通过仿真和插秧试验验证了其在自动转向控制方面的性能。李革等^[14]基于对插秧机不同行驶路径进行仿真实验,开发了插秧机自动驾驶导航控制系统,并通过田间试验验证了其路径跟踪精度和可靠性。综上所述,现有研究在平原地区高效适用插秧机结构优化^[15]和自动驾驶路径跟踪控制^[16]方面取得了重要进展,然而对于深泥脚水田插秧机的适应性研究仍较为缺乏。

一些学者也针对深泥脚水田工况,开展了农机

研究。刘伟健等^[17]设计了一种自适应仿形割台,以应对泥脚深浅不一对再生稻头季机械收获时留茬高度的影响,并在仿真与实际试验中验证了其控制效果和调节精度。HE 等^[18]针对农机在泥泞田地中卡住或损坏的困境,研制了具备小转弯半径和良好通过性的 4WSS 电动底盘,通过定制转向桥和轮内驱动电机实现同步转向与前进,验证了其在速度和转向角跟踪上的有效性。CHEN 等^[19]针对于水稻收获机设计了一种农业机械圆弧边缘轮,利用有限元模型对其与泥土的相互作用进行评价,验证了该轮在减小轮下沉和土体反力方面具备良好的行驶性能。综上所述,现有研究在深泥脚水田工况下的农机设计方面取得了一定进展,然而这些研究主要集中在泥泞地带和机械收获领域,对于南方丘陵山区深泥脚水田插秧机方面的研究还未见报道。

基于此,面向南方丘陵山区深泥脚水田插秧作业陷机问题,提出一种双螺旋驱动式^[20]深泥脚水田插秧机。系统分析该插秧机运动原理,构建插秧机整机结构模型和螺旋驱动轮结构参数设计模型;分析双螺旋结构对行驶方向和推进力的影响关系,并提出各螺旋驱动轮电机匹配方法;设计整机控制系统并进行样机制作和田间试验。

1 丘陵山区深泥脚水田插秧机结构与工作原理

1.1 整机结构

双螺旋驱动式丘陵山区深泥脚水田插秧机整机结构如图 1 所示,主要由秧苗栽插机构和双螺旋驱动装置组成。其中,双螺旋驱动装置包括两个具有一定中心距且旋向相反的螺旋叶片。为了保证在丘陵山区深泥脚水田中正常作业,防止整机沉陷,该插秧机桁架和腹板结构采用高强度轻质铝合金材料制

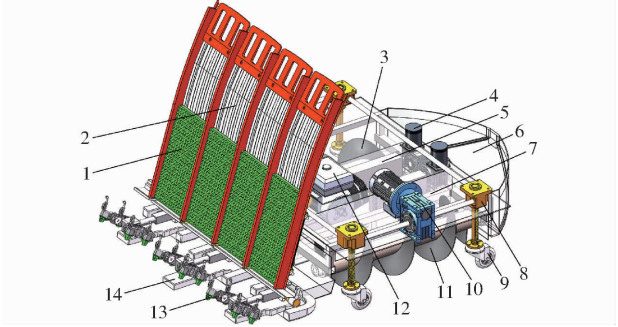


图 1 双螺旋驱动式插秧机三维模型

Fig. 1 3D model of double helix driven rice transplanter

- 1. 水稻育秧盘 2. 秧苗架 3. 左旋螺旋驱动轮 4. 减速电机
- 5. 控制器 6. 船体 7. 桁架 8. 升降丝杆机构 9. 陆地行走轮
- 10. 升降电机 11. 右旋螺旋驱动轮 12. 增程器 13. 栽插机械手 14. 浮船

成,以降低整机重量。

1.2 工作原理

如图2所示,双螺旋驱动式丘陵山区深泥脚水田插秧机作业时,螺旋叶片与泥土相互作用获得来自泥土的反作用力,从而推动螺旋轮前进。

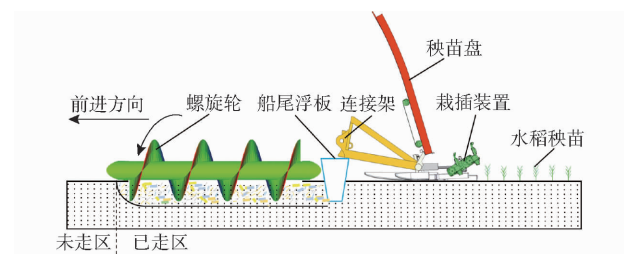


图2 整机工作原理图

Fig.2 Working principle diagram of whole machine

由于两螺旋驱动轮叶片旋向相反,通过调节两直流电机转速和旋转方向,可以实现插秧机前进、倒退和转向。为提高该插秧机在深泥脚水田中的适应性,其前端设计为流线型结构,中间采用船体槽使得其能够在深泥脚水田中浮起;船尾浮板结构对螺旋驱动轮走过的痕迹进行平整处理,便于插秧后立秧。

1.3 螺旋驱动轮结构与参数

如图3所示,螺旋驱动轮是整个插秧机行走装置的核心部件,主要由轴和螺旋叶片组成。图中, d 为螺旋轴直径, L 为螺旋驱动轮长度, α 为螺旋叶片升角, h 为螺旋叶片高度, P 为螺距。

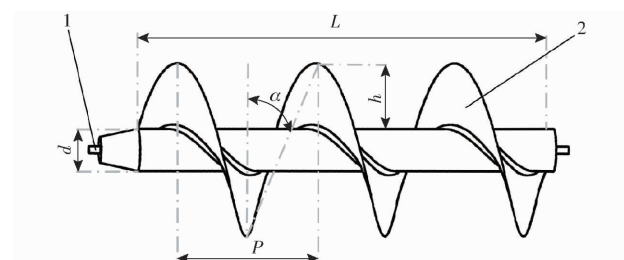


图3 螺旋驱动轮结构示意图

Fig.3 Helix drive wheel structure diagram

1. 轴 2. 螺旋叶片

螺旋叶片螺旋线表达式为

$$\begin{cases} x = R \cos t \\ y = R \sin t \\ z = P / (2\pi t) \end{cases} \quad (1)$$

$$P = \pi R \tan \alpha \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad R = r + h \quad (3)$$

式中 r ——螺旋轴半径,mm

R ——螺旋驱动轮半径,mm

t ——螺旋绕轴旋转角度, ($^\circ$)

考虑到插秧机在丘陵山区水田行进时需要较大推力和较低速度,根据螺旋推进的多模态水陆两栖机器^[21],选用 40° 的螺旋升角,将其代入式(2),得到螺距为791 mm。

螺旋轴材料为2 mm厚的304工业不锈钢,具有良好的密封和防锈性能。螺旋叶片作为受力面,需具备抗腐蚀和高抗折弯性能,因此选用厚度为2 mm的不锈钢板。

2 插秧机行驶方向与动力分析

2.1 行驶方向

当两个螺旋驱动轮等速但旋向相反时,如图4a、4b所示,左轮和右轮的轴向力方向相同且大小相等,侧向力方向相反且大小也相等。由于侧向力相互抵消,在两螺旋驱动轮合力作用下,将驱动插秧机实现前进或后退运动^[22]。当插秧机右转向时,如图4c所示,左轮螺旋叶片顺时针转动但右轮制动;在插秧机左转向时,如图4d所示,右轮螺旋叶片逆时针转动但左轮制动。且插秧机转弯半径与左右螺旋驱动轮的转速差有关,当左右轮转速差增加时,转弯半径减小,反之亦然。图中, ω_L 为左旋驱动轮角速度, ω_R 为右旋驱动轮角速度,且 $|\omega_L| = |\omega_R|$ 。图中箭头方向表示螺旋行走装置行驶受力方向, F_{Ly} 为左旋驱动轮轴向力, F_{Ry} 为右旋驱动轮轴向力, F_{Lx} 为左旋驱动轮侧向力, F_{Rx} 为右旋驱动轮侧向力。

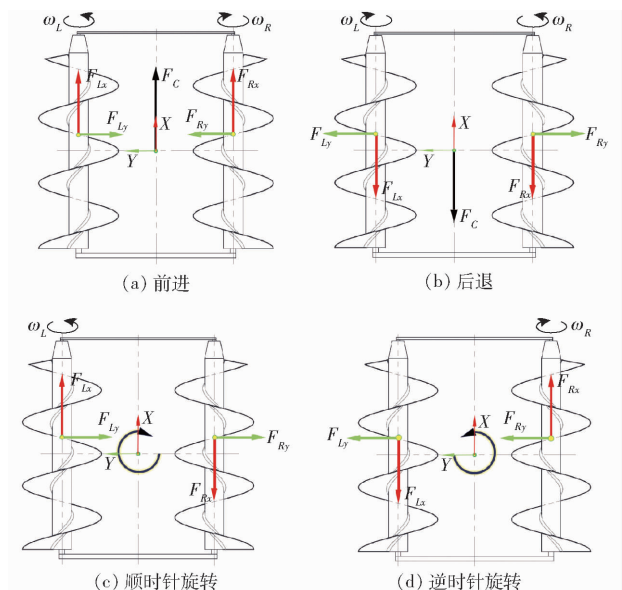


图4 左右螺旋驱动轮转向与插秧机行驶方向关系示意图

Fig.4 Schematics of relationship between left and right helix driving wheel steering and driving direction of transplanter

2.2 推进力

在插秧机行驶过程中,受到的阻力沿螺旋叶片法线方向,可将其分解为沿螺旋驱动轮轴向方向的轴向力和水平方向的侧向力^[23]。取螺旋叶片上一微扇形,则其面积为

$$dA(\theta) = \pi(R^2 - r^2)d\theta \quad (4)$$

式中 dA ——微扇形面积,mm²

$d\theta$ ——微扇形所对应的角度, ($^{\circ}$)

如图 5 所示, 单个螺旋叶片所受的力 F 为

$$F = \iint (\tau \cos \xi - \sigma \sin \xi) dA d\theta \tag{5}$$

其中 $\xi = \arctan(\cos(2\pi - \alpha) - \tan\theta)$
式中 τ ——螺旋叶片对水田稀泥的剪切力, N
 σ ——水田稀泥对螺旋叶片的正压力, N
 θ ——单个螺旋叶片与稀泥接触面的圆心角, ($^{\circ}$)
 ξ ——螺旋叶片与水田稀泥接触的压力角, ($^{\circ}$)

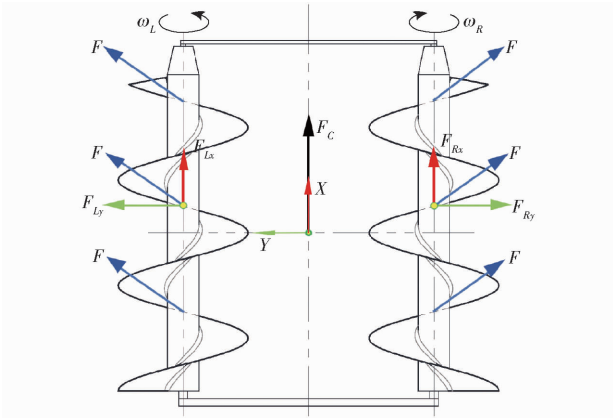


图 5 双螺旋驱动轮推进力受力示意图
Fig. 5 Schematic of propulsion force of double helix driving wheel

将单个螺旋叶片所受的力进行分解, 则轴向力为

$$F_x = \sum \operatorname{sgn}(\omega) F \cos \alpha \tag{6}$$

侧向力为

$$F_y = \sum \operatorname{sgn}(\omega) F \sin \alpha \tag{7}$$

式中 ω ——螺旋驱动轮角速度, rad/s
其中, 以顺时针方向为正, 则

$$\operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} 1 & (\omega > 0) \\ 0 & (\omega = 0) \\ -1 & (\omega < 0) \end{cases} \tag{8}$$

当插秧机左右驱动轮分别以 ω_L 和 ω_R 运转时, 机体所受侧向力大小一致, 方向相反, 故机体所受的力为

$$F_c = F_{Lx} + F_{Rx} \tag{9}$$

式中 F_{Lx} ——左侧螺旋驱动轮轴向力, N
 F_{Rx} ——右侧螺旋驱动轮轴向力, N

2.3 电机选型

双螺旋驱动式丘陵山区深泥脚水田插秧机动力主要由电机提供, 由于采用独立动力设计, 因此需要行驶、升降和栽插 3 种不同规格的电机。

电机扭矩计算公式为

$$T = \frac{F_i r}{\eta} \tag{10}$$

式中 F_i ——行驶、升降和栽插分别受到的力, N
 T ——电机扭矩, N·m
 η ——驱动系统效率, %
电机功率 P_m 计算公式为

$$P_m = \frac{Tn}{9\,550} \tag{11}$$

式中 n ——电机转速, r/s
2.3.1 双螺旋驱动行驶装置电机

双螺旋驱动行驶装置是插秧机的行驶驱动机构, 它通过双螺旋驱动系统实现插秧机的行驶功能。由图 5 推进力分析计算出驱动装置所需的推力 F_c , 将双螺旋驱动装置的驱动轮半径 R 代入公式 (10) 可得双螺旋驱动行驶装置电机扭矩, 并根据螺旋叶片驱动轮的转速求得电机功率^[24]。

2.3.2 升降机构电机

升降机构是插秧机重要组成部分, 它负责起升和降低栽插装置。栽插装置重力计算式为

$$G = mg \tag{12}$$

式中 m ——需要升降的质量, kg
 g ——重力加速度, m/s²

在选择升降机构电机时, 需要考虑升降行程 r_2 , 将起升栽插装置的重量计算所需力 G 和升降行程 r_2 代入公式 (10) 可得升降机构的电机扭矩, 同时根据升降机构工作转速 n_c 可求得升降机构电机功率。

2.3.3 栽插装置电机

栽插装置是插秧机重要组成部分, 其功能是将秧苗精确地插入土壤中, 所需扭矩计算公式为

$$T = F_z l \tag{13}$$

式中 F_z ——栽插机械手插秧时所需的力, N
 l ——插植臂长度, m

将扭矩和栽插机构转速 n_z 代入公式 (11) 求得栽插装置电机功率。

3 控制系统设计

3.1 控制原理

插秧机在丘陵山区深泥脚水田行驶时, 控制其保持稳定的直线行驶方向和行驶速度十分关键。

图 6 为双螺旋驱动式丘陵山区深泥脚水田插秧机控制系统原理图。该控制系统主要由无线遥控器、控制面板、电机驱动器、转速传感器和六轴加速度传感器组成。控制面板集成了无线接收装置用于接收无线遥控器发送的指令; 转速传感器用于测量螺旋驱动轮实际转速并反馈给控制面板, 用以实时调整驱动轮转速使得两驱动轮转速保持同

步;六轴加速度传感器用于测量插秧机行驶方向(航向),并根据滑模变结构控制算法^[25]的输出调整 L298N 模块输入引脚的电平,进而控制电机正反转和转速。

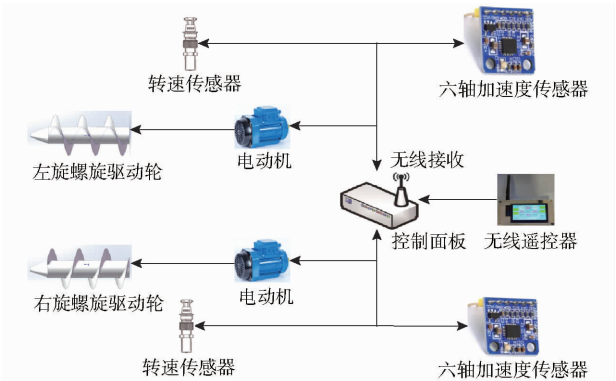


图 6 双螺旋插秧机行驶装置控制原理图

Fig. 6 Control schematic of driving device of double helix transplanter

3.2 系统构成

针对插秧机控制系统的功能需求,设置系统初始化、底盘运动控制、插秧装置控制、运动位姿分析、OLED 显示共 5 个主要任务来完成插秧机的行驶和插秧作业。系统初始化任务主要是初始化控制面板外设驱动、初始化控制面板与外部传感器和执行器的硬件接口等;底盘运动控制任务主要是通过滑模变结构控制算法控制两个直流电机转速,从而精确控制插秧机的行驶和转向;插秧装置控制任务主要是通过 L298N 控制板控制电动推杆的伸缩,从而控制插秧装置抬起高度和下陷深度,并在插秧机转弯时控制插秧装置抬起;运动位姿分析任务,是通过扩展卡尔曼滤波算法融合 IMU 和编码器数据计算实时位姿^[26],使插秧机获得准确的定位输出;OLED 显示任务主要是在 OLED 显示屏上显示控制模式、电机转速、加速度等信息,插秧机控制系统总体框图如图 7 所示。

插秧机在丘陵山区深泥脚水田行驶过程中,由于土壤承载能力差,左右螺旋驱动轮与水田土壤的接触情况不同,造成其沉陷量和滑转率也不相同。在直线行驶时,不仅会导致其实际行驶速度与设定速度出现较大偏差,还会导致行驶方向偏离设定航向。因此,需根据插秧机实际行驶速度和航向不断调整左右轮的转速,使其接近目标行驶速度和方向。行驶速度与航向控制流程如图 8 所示。

4 田间性能试验

4.1 试验条件

为测试所设计的插秧机在丘陵山区深泥脚水田

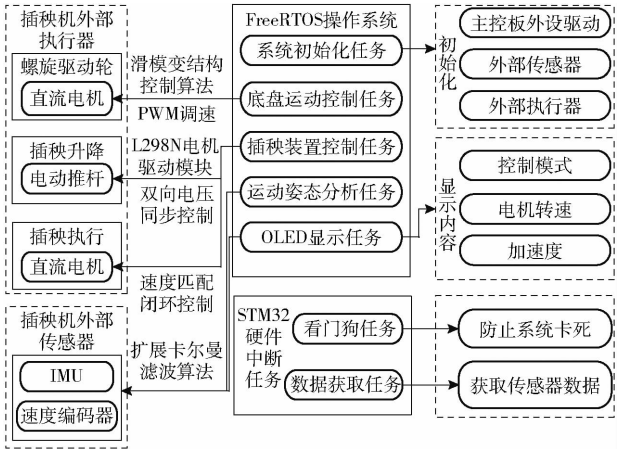


图 7 插秧机控制系统总体框图

Fig. 7 Overall block diagram of rice transplanter control system

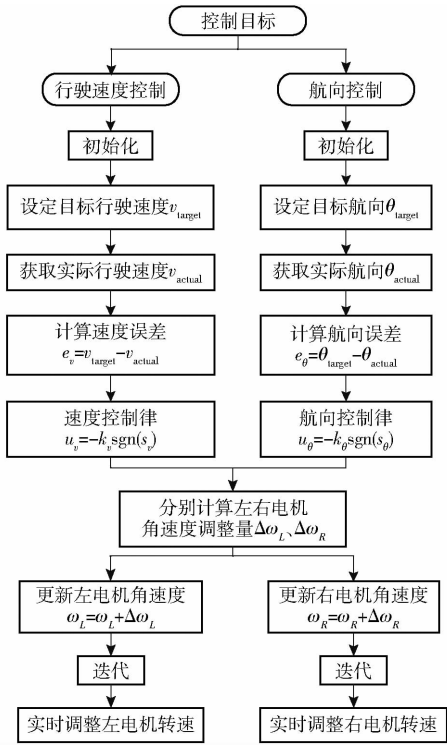


图 8 行驶速度与航向控制流程图

Fig. 8 Flowchart of travel speed and heading control

中的作业适应性和有效性,制造了一台试验样机并进行田间试验,试验地点为重庆市璧山区西南大学水稻试验农场。

该试验田为西南丘陵地区典型的深泥脚水田,具有较为复杂的地形和土壤条件。依据 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件 测定方法的一般规定》,使用 SC900 型土壤坚实度仪(极限深度:450 mm;最大载荷:10 MPa)测量水田土壤坚实度和泥脚深度。测试结果表明,当泥脚深度为 375 mm 时,土壤坚实度为 379.21 kPa;当泥脚深度为 430 mm 时,土壤坚实度达 517.11 kPa。

试验仪器设备包括双螺旋驱动式丘陵山区深泥

脚水田插秧机、游标卡尺、米尺、转速测量仪、秒表、拉力计等。双螺旋驱动式丘陵山区深泥脚水田插秧机试验样机主要参数如表 1 所示。

表 1 双螺旋驱动式丘陵山区深泥脚水田插秧机
试验样机主要参数

Tab.1 Main parameters of experimental prototype
of rice transplanter with deep mud feet paddy held in
hilly and mountainous areas based on double screw drive

参数	数值
质量/kg	368
电机功率/kW	1.8
螺旋轴直径/mm	55
螺旋轴长度/mm	970
螺旋升角/(°)	40
螺旋叶片高度/mm	150
插秧行数	4
行距/mm	300
栽插株距/mm	150

试验时,使用秒表记录插秧机的行驶时间,米尺测量行驶距离,游标卡尺测量整机沉陷量,转速测量仪测量螺旋驱动轮转速。试验过程如图 9 所示,螺旋驱动轮行驶之后在深泥田上留下槽型轨迹,轨迹深度均匀,行进过程平稳,但在船尾浮板结构的整平作用下,该槽型痕迹有效消除。

4.2 适应性评价

采用滑转率和沉陷量两个指标对所提出的插秧机在丘陵山区深泥脚水田的适应性进行评价。

(1)滑转率

插秧机在作业过程中会受到水田泥浆的阻力。因此,插秧机理论行驶速度与实际行驶速度会发生偏差,定义插秧机理想行驶速度与实际行驶速度之



图 9 双螺旋驱动式插秧机田间试验

Fig.9 Field experiment of double helix driven transplanter

差相对于理论速度的百分比为滑转率。滑转率反映插秧机在深泥脚水田行驶时的打滑程度,是衡量插秧机行驶效果的重要指标。

(2)沉陷量

沉陷量是指插秧机在深泥脚水田行驶的过程中插秧机底部相对于水田表面的垂直下沉距离。该指标反映插秧机在田间作业时对水田土壤结构的影响,其计算公式为

$$H = a + bn + cn^2 + dS \tag{14}$$

式中 H ——沉陷量,mm

$a、b、c、d$ ——比例系数

n ——电机转速,r/s

S ——插秧机行驶过程中的滑转率,%

4.3 结果与分析

为降低试验误差,确保数据的可靠性和准确性,双螺旋驱动式插秧机在不同螺旋驱动轮转速情况下,分别进行 3 次重复试验,每组试验均在相同环境条件下独立进行,以消除外部变量干扰。试验结果如表 2 所示。

表 2 直线行驶测试结果
Tab.2 Straight line driving test results

序号	螺旋轮角速度/ (rad·s ⁻¹)	螺旋轮转速/ (r·s ⁻¹)	前进距离/ m	第 1 次行驶 时间/s	第 2 次行驶 时间/s	第 3 次行驶 时间/s	平均时间/ s	行进速度/ (m·s ⁻¹)
1	2.199	0.35	5	17.14	18.94	18.47	18.18	0.275
2	4.273	0.68	5	9.45	9.44	9.30	9.40	0.532
3	6.032	0.96	5	7.11	6.95	6.21	6.76	0.740
4	8.357	1.33	5	5.21	4.81	4.68	4.90	1.020

根据试验结果,基于线性回归拟合得到螺旋驱动轮转速与插秧机行驶速度关系曲线如图 10 所示。从图 10 中可以发现,驱动轮转速与机体速度呈线性关系,且随着驱动轮转速的增加,插秧机直线行驶速度也随之增加,比例系数约为 0.758 75,拟合决定系数为 0.999 92,两者线性相关性较高。

为了测试双螺旋插秧机在无控状态下直线偏移

量,设置螺旋驱动轮转速为 0.35、0.68、0.96、1.33 r/s,测量 20 m 作业,实际距离与基准线的距离标准偏差即为无控状态直线偏移量。

测量结果显示在泥脚深度 430 mm 的试验水田中最大无控状态直线偏移量为 0.021 m,符合国家标准 GB/T 20864—2021《水稻插秧机 技术规范》规定的小于等于 0.025 m。这表明双螺旋插秧机在无

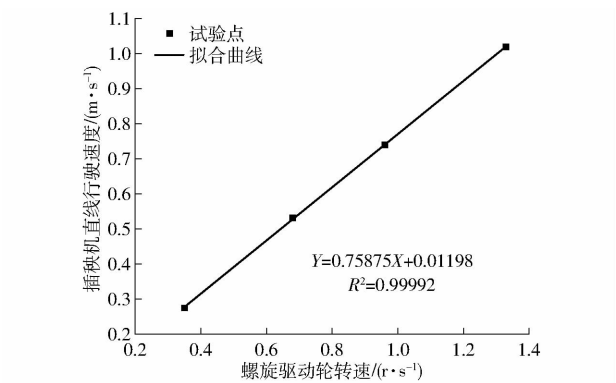


图 10 螺旋驱动轮转速与插秧机直线行驶速度拟合曲线

Fig.10 Helix driving wheel speed and transplanter straight speed fitting curve

控状态直线行驶中稳定性良好,满足水稻插秧技术的要求。插秧机在不同螺旋驱动轮转速下无控状态直线行驶轨迹如图 11 所示。

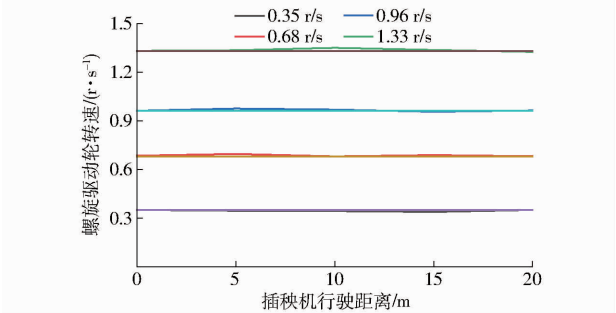


图 11 插秧机在不同螺旋驱动轮转速下的无控状态直线行驶轨迹

Fig.11 Straight line driving trajectory diagram of uncontrolled state of transplanter at different helix driving wheel speeds

由插秧机实际行驶速度和理想行驶速度计算出行驶滑转率,试验结果表明,双螺旋插秧机在泥脚深度 430 mm 的试验水田中行驶时,随着螺旋驱动轮转速的增加,插秧机行驶速度增加的同时,其滑转率也随之增加。当螺旋驱动轮转速为 1.33 r/s 时,插秧机行驶速度达到 1.02 m/s,此时滑转率达到最大值 3.045%。

在泥脚深度 375 mm 的试验田块中,插秧机正常行驶时沉陷量为 47 mm;而在泥脚深度 430 mm 的试验田块中,插秧机沉陷量增加至 65 mm。试验结果表明,插秧机沉陷量随泥脚深度的增加呈现出明显的增加趋势。滑转率与沉陷量变化趋势如图 12 所示。

同时,随着螺旋驱动轮转速的增加,最大沉陷量由 148.67 mm 逐渐减小至 59.74 mm。以上结果表明,双螺旋插秧机在优化打滑和沉陷量方面具有较好的效果,且适应不同水田环境条件。

为准确描述插秧机沉陷量与螺旋驱动轮转速及

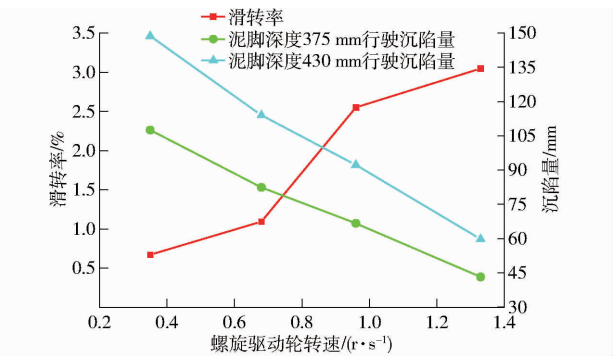


图 12 沉陷量、滑转率随螺旋驱动轮转速的变化曲线

Fig.12 Change curves of subsidence and slip rate with speed of screw driving wheel

滑转率之间的关系,对上述试验数据进行多项式回归分析,得到沉陷量 H 的拟合公式

$$H=135.68-90.78n+9.82n^2+3.58S \quad (15)$$

由公式(15)可以发现,该插秧机沉陷量与螺旋驱动轮转速呈非线性关系,同时,滑转率对沉陷量有着正向影响,滑转率越大,沉陷量越大。

最后,在不同泥脚深度的试验田块中,开展了插秧效果试验,测试该插秧机的插秧效率和秧苗栽插质量——漂秧率、漏插率和伤秧率。具体试验结果如下:在泥脚平均深度为 375 mm 的水田中,秧苗漂秧率、漏插率和伤秧率分别为 2.16%、3.82%、1.06%;而在泥脚平均深度为 430 mm 的试验水田中,秧苗漂秧率、漏插率和伤秧率分别为 2.78%、4.39%、1.27%。插秧试验的各项指标均符合国家标准 GB/T 20864—2021《水稻插秧机 技术规范》中的规定:漂秧率、漏插率、伤秧率分别小于等于 3%、5%、4%。不同泥脚深度的秧苗栽插质量和插秧效率如表 3 所示。

表 3 双螺旋插秧机在不同泥脚深度水田作业的秧苗栽插质量和插秧效率

Tab.3 Seedling planting quality and transplanting efficiency of double helix driven transplanter in paddy fields with different mud feet

试验田块泥脚深度/mm	漂秧率/%	漏插率/%	伤秧率/%	插秧效率/($\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)
375	2.16	3.82	1.06	0.166
430	2.78	4.39	1.27	1.137

本次田间试验调节插植臂株距为 150 mm,为了验证插植株距的稳定性,通过随机抽样,分别对不同泥脚深度的试验田块栽插株距进行测量,并将其与插植臂设定的株距进行对比。测量结果显示,插植株距误差在 ± 5 mm 以内,相对均匀度达到 92%,符合国家标准 GB/T 20864—2021《水稻插秧机 技术规范》中的规定:相对均匀度大于等于 85%。这表

明双螺旋水稻插秧机在运行过程中具备较高的株距稳定性,满足水稻生产的需求。

5 结论

(1)为解决插秧机在丘陵山区深泥脚水田作业时面临的陷机问题,设计了一种双螺旋驱动式丘陵山区深泥脚水田插秧机,系统分析了该插秧机运动原理,提出了其螺旋驱动轮结构参数设计模型和驱动电机匹配方法,并设计了整机控制系统。

(2)样机试验结果表明,所设计的双螺旋插秧机在丘陵山区深泥脚水田中具备优异的通过性和稳

定的直线行驶性能。在螺旋驱动轮转速为 1.33 r/s 时,插秧机行驶速度为 1.02 m/s,滑转率达到最大值 3.045%,符合国家标准规定的行驶稳定性。同时,试验显示随着螺旋驱动轮转速的增加,插秧机沉陷量呈下降趋势,最大沉陷量从 148.67 mm 逐渐减少至 59.74 mm,表明插秧机在优化打滑和沉陷量方面具有良好的效果。此外,在泥脚深度为 430 mm 的田块中,最大无控状态直线偏移量为 0.021 m,满足 GB/T 20864—2021《水稻插秧机 技术规范》标准,验证了插秧机在深泥脚环境下的适应性和作业质量。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社,2023.

[2] 林建平,邓爱珍,赵小敏,等. 南方典型丘陵山区不同高程耕地土壤养分变化特征分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 300–309.

LIN Jianping, DENG Aizhen, ZHAO Xiaomin, et al. Soil nutrient change characteristics of cultivated land at different elevations in typical hilly areas in southern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 300–309. (in Chinese)

[3] 关雅琪,鄂志国,王磊,等. 影响中国水稻生产环节外包发展因素的实证研究:基于群体效应视角[J]. 中国水稻科学, 2024, 38(3): 324–334.

GUAN Yaqi, E Zhiguo, WANG Lei, et al. An empirical study on factors influencing the development of rice production outsourcing in China: based on the perspective of population effect[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2024, 38(3): 324–334. (in Chinese)

[4] 吴峰,李沛鸿,熊凡,等. 基于遥感的南方丘陵山区耕地撂荒研究[J]. 北京测绘, 2022, 36(11): 1519–1523.

WU Feng, LI Peihong, XIONG Fan, et al. Research on farmland abandonment in southern hilly region based on remote sensing [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2022, 36(11): 1519–1523. (in Chinese)

[5] 李泽华,马旭,李秀昊,等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 1–20.

LI Zehua, MA Xu, LI Xiuhao, et al. Research progress of rice planting mechanization technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):1–20. (in Chinese)

[6] 陈训教,吕志军,薛向磊,等. 无线遥控步行插秧机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 10–17.

CHEN Xunjiao, LÜ Zhijun, XUE Xianglei, et al. Design and experiment of wireless remote control walking rice transplanter [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 10–17. (in Chinese)

[7] 朱德泉,熊玮,蒋锐,等. 2ZGK-6 型可调宽窄行高速水稻插秧机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 37–45.

ZHU Dequan, XIONG Wei, JIANG Rui, et al. Design and experiment of 2ZGK-6 high speed rice transplanter with adjustable width and narrow row[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 37–45. (in Chinese)

[8] 马旭,赵旭,刘赛赛,等. 水稻高速插秧机固体颗粒肥料变量施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 99–110.

MA Xu, ZHAO Xu, LIU Saisai, et al. Design and experiment of variable fertilizer device for solid particle fertilizer in high-speed rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 99–110. (in Chinese)

[9] 许春林,单伊尹,辛亮,等. 探出开孔式高速水稻膜上插秧机分插机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 79–87.

XU Chunlin, SHAN Yiyin, XIN Liang, et al. Design and experiment of splicing mechanism of high speed rice membrane transplanter with probe opening[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 79–87. (in Chinese)

[10] 马悦琦,迟瑞娟,赵彦涛,等. 基于模糊控制的插秧机 LQR 曲线路径跟踪控制器优化方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 1–8, 102.

MA Yueqi, CHI Ruijuan, ZHAO Yantao, et al. Optimization method of LQR curve path tracking controller for rice transplanter based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 1–8, 102. (in Chinese)

[11] 迟瑞娟,熊泽鑫,姜龙腾,等. 基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 22–30, 99.

CHI Ruijuan, XIONG Zexin, JIANG Longteng, et al. Path tracking control algorithm of rice transplanter based on model

prediction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 22–30, 99. (in Chinese)

[12] 何杰,朱金光,罗锡文,等. 电动方向盘插秧机转向控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 10–17.
HE Jie, ZHU Jinguang, LUO Xiwen, et al. Design of steering control system for electric steering wheel transplanter[J]. Transactions of the SAE, 2019, 35(6): 10–17. (in Chinese)

[13] 何杰,朱金光,张智刚,等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 17–24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for Rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 17–24. (in Chinese)

[14] 李革,王宇,郭刘粉,等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 21–26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure tracking Algorithm for navigation path tracking of rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 21–26. (in Chinese)

[15] 胡冰,付袁,王人齐,等. 水稻种植机行走装置的研究现状分析[J]. 农业科学, 2022, 12(11): 1161–1171.
HU Bing, FU Yuan, WANG Renqi, et al. Research status analysis of walking device of rice planter[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 12(11): 1161–1171. (in Chinese)

[16] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1–18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of navigation technology for agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1–18. (in Chinese)

[17] 刘伟健,罗锡文,曾山,等. 基于模糊 PID 控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 1–9.
LIU Weijian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Performance test and analysis of adaptive copying cutting table for regenerated rice based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 38(10): 1–9. (in Chinese)

[18] HE S, SHEN Y, ZHANG Y, et al. Development and evaluation of 4WSS electric-driven chassis for high-clearance sprayer [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1258744.

[19] CHEN Z, GU J, YANG X. A novel rigid wheel for agricultural machinery applicable to paddy field with muddy soil[J]. Journal of Terramechanics, 2020, 87: 21–27.

[20] VILLACRES J, BARCZYK M, LIPSETT M. Literature review on archimedean screw propulsion for off-road vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 2023, 108: 47–57.

[21] MA X, WANG G, LIU K. Design and optimization of a multimode amphibious robot with propeller-leg[J]. IEEE Transactions on Robotics; A publication of the IEEE Robotics and Automation Society, 2022, 38(6): 3807–3820.

[22] YAO S, CHENG X, LIU Z, et al. An omnidirectional screw-driven forestry robot[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 42(1): 257–271.

[23] ZENG Y, HU Q, YIN S, et al. The ground motion dynamics analysis of a bionic amphibious robot with undulatory fins[C]// 2021 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR). IEEE, 2021: 1385–1390.

[24] 张皓尘,汪春,李海亮,等. 电驱动水稻插秧机设计与参数优化[J]. 农机化研究, 2023, 45(7): 156–161.
ZHANG Haochen, WANG Chun, LI Hailiang, et al. Design and parameter optimization of electric driven rice transplanter [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(7): 156–161. (in Chinese)

[25] 黄皓,涂群章,蒋成明,等. 基于扰动观测器的农用驱动电机变速滑模控制[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 447–458.
HUANG Hao, TU Qunzhang, JIANG Chengming, et al. Variable speed sliding mode control of agricultural drive motor based on disturbance observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 447–458. (in Chinese)

[26] ROBERT B, SREE K P, JORAN B, et al. Multi-environment robotic transitions through adaptive morphogenesis[J]. Nature, 2022, 610: 283–289.