

播深自动调控稻麦联合播种机设计与试验

雍凯¹ 王刚² 王征兵¹ 左黎明¹ 杨亚¹

(1. 芜湖职业技术学院智能制造学院, 芜湖 241006; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对长江中下游地区因田地崎岖不平导致稻麦种子播种深度不稳定的问题, 设计了2BFGL-19型播深自动调控稻麦联合播种机, 该机具通过双侧播深监测装置实时获取田地起伏信息, 并将其转化为液压系统控制指令, 进而驱动播深调控装置动态调整左右倾斜角度, 确保开沟器在不同坡度的田地上, 始终保持稳定的开沟深度, 实现精准播种作业。对播深调控装置和播深监测装置等关键部件进行设计, 基于播深自动调控原理搭建了液压传动及控制系统。通过对两侧播深监测装置运动分析, 在地面倾斜临界角为 3° 的前提下, 得到接触片至前、后触模块的距离分别为19.07 mm和12.29 mm。以各行排种量一致性变异系数为评价指标, 开展了规范性动态试验, 以播种深度合格率及播种均匀性变异系数为评价指标, 开展了田间试验。试验结果表明, 当试验机作业速度为0.6~1.2 m/s时, 各行排种量一致性变异系数平均值为3.44%; 播种深度合格率为87.04%; 播种均匀性变异系数平均值为22.86%。各项指标均达到谷物播种机械作业质量标准, 对比原型机综合性能有所提升, 试验结果满足设计要求。

关键词: 稻麦播种机; 播深监测; 播深调控; 液压系统

中图分类号: S223.2⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)08-0265-09

OSID:



Design and Test of Rice and Wheat Combined Seeder of Sowing Depth Automatic Control

YONG Kai¹ WANG Gang² WANG Zhengbing¹ ZUO Liming¹ YANG Ya¹

(1. School of Smart Manufacturing, Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241006, China

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: For the problem of unstable sowing depth of rice and wheat seeds due to the unevenness of the fields in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the 2BFGL-19 sowing depth automatic regulation rice and wheat combined seeder was developed, which can monitor and automatically adjust the sowing depth in real time. The key components such as the sowing depth control device and the sowing depth monitoring device were designed, and the hydraulic transmission and control system was established based on the principle of sowing depth automatic control. Through the motion analysis of the sowing depth monitoring device on both sides, the relation between the sloping ground and the distance from the touch plate to the front and rear touch modules was obtained. On the premise that the critical angle of the sloping ground was 3° , the distance from the touch plate to the front and rear touch modules were 19.07 mm and 12.29 mm. The coefficient of variation of the consistency of the sowing amount of each row was taken as the evaluation index, the standard dynamic test was carried out. The test results showed that when the test machine worked at speed of 0.6 m/s to 1.2 m/s, the average coefficient of variation of the consistency of the sowing amount of each row was 3.44%, and the sowing amount consistency of the machine was good. Taking into account the working efficiency, when the working speed was 0.8 m/s, the coefficient of variation of consistency of sowing amount of each row of the test machine was 3.24%, which was better than 3.62% of the prototype machine, and the test machine had better sowing stability at this speed section. The qualified rate of sowing depth and the coefficient of variation of sowing

收稿日期: 2025-01-11 修回日期: 2025-05-18

基金项目: 安徽省高校科学研究项目(2024AH052010)、江苏省科技项目(SZ-YC202010)、安徽省质量工程省级项目(2024jxnm0909)和芜湖职业技术学院科技创新团队项目(wzykytd202403)

作者简介: 雍凯(1988—), 男, 讲师, 主要从事农业机械化研究, E-mail: 756702094@qq.com

通信作者: 王刚(1988—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事智能农业装备与旱地栽植技术研究, E-mail: 421404047@qq.com

uniformity was taken as the evaluation index. The field test was carried out. The test results showed that the qualified rate of sowing depth was 87.04%, the average coefficient of variation of sowing uniformity was 22.86%. All indexes met the operation quality of grain drill standards, compared with the prototype machine, the comprehensive performance of the test machine was improved. The test results met the design requirements.

Key words: rice and wheat seeder; sowing depth monitoring; sowing depth control; hydraulic system

0 引言

长江中下游地区是我国南方稻麦种植的主要区域,包含丘陵和平原两种地形,田地多崎岖不平、形状不规则^[1]。因此,该区域稻麦播种机性能一直受到影响。目前,研究人员对播种机性能的研究主要包括关键结构的优化^[2-6]和智能控制的融合^[7-13]。

在播种机智能控制的研究中,播种深度的不稳定性一直是长江中下游地区机械化种植所要攻破的难题,播种深度是影响农作物生长的重要因素之一,不适宜的播种深度无法为种子提供适宜的生长环境,进而影响农作物的产量^[14-15]。

近年来,国内外专家对播种机播种深度智能控制的研究取得了一定成果^[16-21]。这些研究在播种深度智能控制方面虽取得了一定进展,但仍存在一些局限性,如地形适应性有限、传感器精度不足、技术实现成本过高等,这些问题影响了播种深度智能控制技术的应用与推广。

为此,本文基于辉洋 2BFG-19 型播种机研发了 2BFGL-19 型播深自动调控稻麦联合播种机,设计播深调控装置、播深监测装置和液压传动及控制系统,对播种深度实时调节。通过规范性动态试验和田间试验,以排种量一致性系数、播种深度合格率及播种均匀性系数为试验指标,验证播深自动调控系统性能和播种机合理性。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

使用辉洋 2BFG-19 型稻麦联合播种机(盐城市大丰区辉洋农业机械制造有限公司)为原型机,设计了 2BFGL-19 型播深自动调控稻麦联合播种机,如图 1 所示。播种机由镇压装置、可调双圆盘开沟装置、种箱、肥料箱、播深调控装置、牵引架、播深监测装置、旋耕装置等组成。其中,可调双圆盘开沟装置仅通过上方设置的播深调控装置与机架联接,播深调控装置内搭建液压控制系统,通过液压缸输出运动,左右两侧设置播深监测装置,播深监测装置内布置接触感应器,控制电路与液压系统关联。

1.2 工作原理

播深自动调控稻麦联合播种机牵引架通过三点

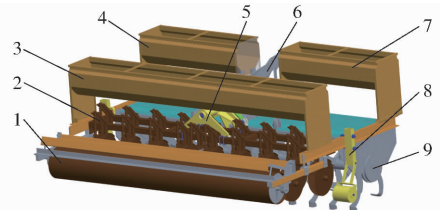


图 1 播深自动调控稻麦联合播种机结构图

Fig.1 Structural diagram of rice and wheat combined seeder of sowing depth automatic control

1. 镇压装置
2. 可调双圆盘开沟装置
3. 种箱
4. 左肥料箱
5. 播深调控装置
6. 牵引架
7. 右肥料箱
8. 播深监测装置
9. 旋耕装置

悬挂与拖拉机联接,拖拉机带动播种机前进作业时,一方面通过动力输出轴带动旋耕装置工作,另一方面通过液压输出口带动播深调控装置工作。在平整田地作业时,按照前进方向,肥料箱的肥料正常落入田里后,旋耕装置对混有肥料的土壤进行旋耕,其后可调双圆盘开沟装置对旋耕后的土壤开沟,接着种箱内的种子通过软管顺着开沟装置落入沟中,最后镇压装置覆土压实。在倾斜地面作业时,播深调控装置和两侧播深监测装置将启用,此时地面因倾斜导致开沟装置开沟深度不一致,左右侧播深监测装置与地面接触高度也会不同,监测装置通过电路控制液压系统工作,播深调控装置上的液压杆将伸出或收回从而带动可调双圆盘开沟装置向左或向右摆动,实现开沟装置与地面倾斜方向一致,最终保证播种深度一致。整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 180×3 110×1 210
作业幅宽/mm	2 600
播种行距/mm	140~160
作业行数	17~19
播种深度/mm	20~40
作业速度/(m·s ⁻¹)	0.6~1.2

2 关键工作部件设计

2.1 播深调控装置结构与原理

针对因田地崎岖不平导致同行左右开沟深度不一致的问题,设计播深调控装置,如图 2 所示。播深

调控装置主要由 U 形紧固件、后支撑板、支撑轴、摆动轴、液压缸上支架、液压缸紧固件、支撑箱体、液压缸、机架连接件、液压缸下支架和前支撑板组成。前支撑板和后支撑板分别与摆动轴套固接,组成摆动组件,并通过 8 组 U 形紧固件固定在可调双圆盘开沟装置的横架上,支撑轴通过滑动轴承安装在摆动轴套和支持箱体中,起开沟装置支撑和角度调节作用,支撑箱体与机架连接件固接,机架连接件与旋耕装置上端机架固接,此时可调双圆盘开沟装置相对于机架左右倾斜来适应田地的崎岖不平。

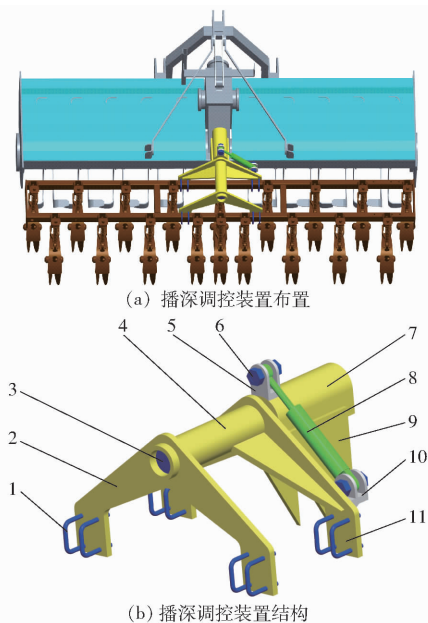


图 2 播深调控装置布置与结构示意图

Fig. 2 Layout and structural schematic of sowing depth control device

1. U 形紧固件 2. 后支撑板 3. 支撑轴 4. 摆动轴套 5. 支撑箱体支架 6. 紧固件 7. 支撑箱体 8. 液压缸 9. 机架连接件 10. 前支撑板支架 11. 前支撑板

摆动角度通过液压传动系统调节,其中液压缸上端通过紧固件固定在支撑箱体支架上,下端通过紧固件固定在前支撑板支架上,液压杆的伸出和收回将控制摆动组件的左右摆动角度,从而带动可调双圆盘开沟装置左右倾斜。

2.2 播深监测装置结构与原理

地面倾斜需要通过监测装置实时监控,在达到一定倾斜角度时,监测装置对液压控制系统发出指令,调整可调双圆盘开沟装置向对应方向倾斜来适应地面,将监测装置与地轮组合设计播深监测装置,如图 3 所示。播深监测装置左右侧各布置一个,主要由地轮轴、地轮、双 U 形架、连接轴、机架连接杆、前触模块、接触片和后触模块组成。地轮与双 U 形架通过地轮轴铰接,作业时可正常在田地滚动,机架连接杆与播种机侧机架通过 U 形紧固件固接,机架

连接杆与连接轴铰接,连接轴与双 U 形架固接,当播种机左右侧高度不一致时,双 U 形架将会适当绕连接轴摆动来适应高度。为将左右侧高度信息反馈至液压控制系统,播深监测装置内需布置接触感应器,具体为机架连接杆内设置前触模块和后触模块,设置接触片固接在连接轴上,并置于前触模块、后触模块之间。

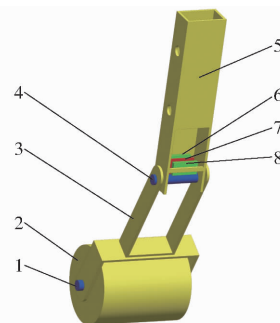


图 3 播深监测装置结构示意图

Fig. 3 Structural schematic of sowing depth monitoring device

1. 地轮轴 2. 地轮 3. 双 U 形架 4. 连接轴 5. 机架连接杆 6. 前触模块 7. 接触片 8. 后触模块

图 4 为地面发生倾斜时播深调控装置和播深监测装置工作原理图。当地面向左倾斜时,固接在播种机机架左侧播深监测装置位置下降,右侧播深监测装置位置抬高,在达到临界倾斜角度时,左侧装置接触片与前触模块接触,右侧装置接触片与后触模块接触,形成导通电路,通过液压控制系统带动双圆盘开沟装置横架向左倾斜,保证横架下所有双圆盘开沟器播深一致,地面向右倾斜同理。由图 4 还可以发现,当地面发生倾斜时,左右侧地轮上升和下降的最大高度相同。

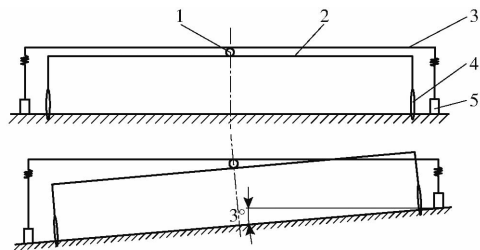


图 4 倾斜地面播深调控系统工作原理图

Fig. 4 Working principle diagram of sowing depth control system on sloping ground

1. 播深调控装置 2. 双圆盘开沟装置横架 3. 播种机机架 4. 双圆盘开沟器 5. 地轮

2.3 液压传动及控制系统设计

与传统机械传动相比,液压传动具有输出转矩大、传输稳定、体积小和质量小等优势^[22-24]。结合播种机结构特点,播深调控装置采用液压传动系统来驱动。播深调控液压系统原理图如图 5 所示。

播深调控液压系统主要由液压泵、液压缸、溢流

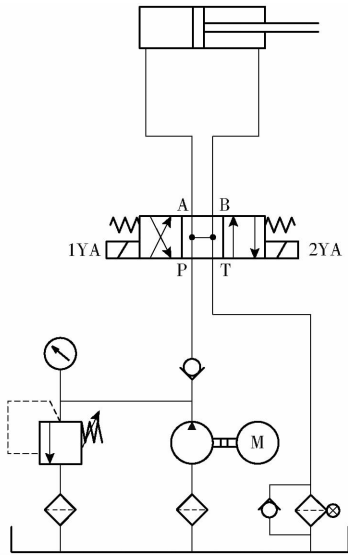


图 5 液压系统原理图

Fig. 5 Principle diagram of hydraulic system

阀、压力表、单向阀、三位四通 H 型电磁换向阀、过滤器和油箱构成。当三位四通 H 型电磁换向阀左位 1YA 通电时,液压油将从液压缸右端进入缸体,液压杆收回,并带动摆动组件向右摆动,从而使可调双圆盘开沟装置向左倾斜。同理,当三位四通 H 型电磁换向阀右位 2YA 通电时,可调双圆盘开沟装置向右倾斜。而当三位四通 H 型电磁换向阀左右位都不通电或同时通电时,换向阀处于中位,播深调控液压系统处于卸荷状态,液压缸左右端无液压力,此时可调双圆盘开沟装置在自重和回位弹簧的作用下,回到初始位置。

三位四通 H 型电磁换向阀左右位的控制电路如图 6 所示。a 为左侧后触模块,线路连接 24 V 电源正极,b 为左侧前触模块,线路连接电磁换向阀左侧 1YA 和电源负极,c 为右侧后触模块,线路连接 24 V 电源正极,d 为右侧前触模块,线路连接电磁换向阀右侧 2YA 和电源负极,中间 e 和 f 分别为左、右侧接触片,用线路连接。正常平整路段时,e 与 a、b、f 与 c、d 均不接触,当路面向左倾斜一定角度后,e 与 b 接触,f 与 c 接触,形成 c、f、e、b、1YA 通路,可调双圆盘开沟装置将向左倾斜来适应地面。同理,路

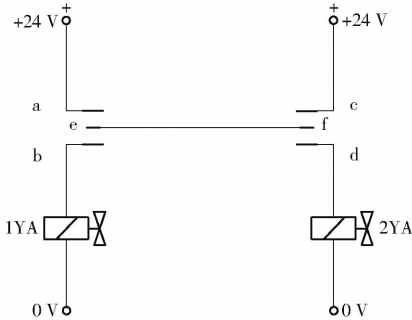


图 6 控制电路

Fig. 6 Control circuit

面向右倾斜一定角度后,形成 a、e、f、d、2YA 通路,可调双圆盘开沟装置将向右倾斜来适应地面。

2.4 播深监测装置关键结构参数设计

播深监测装置运动趋势如图 7 所示,当地面出现倾斜时,播种机两侧地轮与地面接触距离将发生变化。高地面侧如图 7a 所示,因地面抬高,双 U 形架向前摆动,地轮位置提高,当接触片与后触模块接触时,地轮达到特定摆动位置,此后,若地面继续抬高,地轮摆动位置将继续上升,但后续高度对接触片与前、后触模块的距离参数已无影响,所以将地轮特定摆动位置定义为最高有效摆动位置,并用于后续计算;低地面侧如图 7b 所示,因地面下降,双 U 形架会向后摆动,地轮位置降低,当接触片与前触模块接触后,地轮达到最低有效摆动位置。地轮最高和最低有效摆动位置反映了播深监测装置对倾斜地面的适应性,地面倾斜越大,就需要地轮有更大的运动距离适应地面,为了提高播深监测装置的灵敏性,一般结合当地地形特点,优选较小地面倾斜临界角。

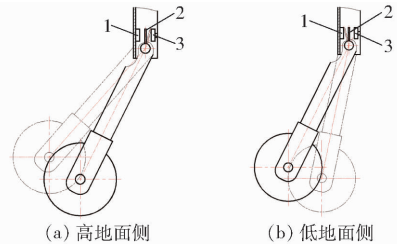


图 7 倾斜地面播深监测装置运动趋势分析

Fig. 7 Motion trajectory of sowing depth monitoring device on sloping ground

1. 前触模块 2. 接触片 3. 后触模块

播深监测装置各构件结构尺寸可结合播种机整机尺寸来设计,但接触片到前、后触模块的距离参数需结合播深监测装置运动分析来确定。

图 8 为高地面侧播深监测装置的运动分析,因地面抬高,地轮轴心从初始位置 O 绕 A 向前摆动,当接触片碰到后触模块后,地轮轴心移动到 O_1 ,此时,地轮轴心 O 至 O_1 垂直方向距离 h_1 为地轮最大有

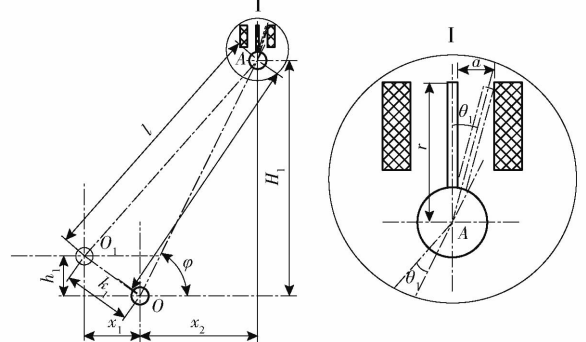


图 8 高地面侧播深监测装置运动分析

Fig. 8 Motion analysis of sowing depth monitoring device on high ground side

效上升高度, h_1 影响接触片到后触模块的距离 a 。

接触片到后触模块的距离 a 为

$$a = r \sin \theta_1 \quad (1)$$

其中

$$\theta_1 = \arccos \frac{2l^2 - k_1^2}{2l^2} \quad (2)$$

$$k_1 = \sqrt{x_1^2 + h_1^2} \quad (3)$$

$$x_1 = \sqrt{l^2 - (H_1 - h_1)^2} - x_2 \quad (4)$$

$$H_1 = l \sin \varphi \quad (5)$$

$$x_2 = l \cos \varphi \quad (6)$$

式中 r ——接触片转动半径, mm

θ_1 ——双 U 形架上摆最大有效角度, ($^\circ$)

k_1 ——地轮上升后最大有效轴心距, mm

x_1 ——地轮上升后最大有效水平距离, mm

l ——双 U 形架有效运动长度, mm

H_1 ——初始位置地轮轴与连接轴垂直距离, mm

x_2 ——初始位置地轮轴与连接轴水平距离, mm

φ ——双 U 形架与地面初始角度, ($^\circ$)

图 9 为低地面侧播深监测装置的运动分析, 因地面降低, 地轮轴心从初始位置 O 绕 A 向后摆动, 当接触片碰到前触模块后, 地轮轴心移动到 O_2 , 地轮轴心 O 至 O_2 竖直方向距离 h_2 为地轮最大有效下降高度, h_2 影响接触片到前触模块的距离 b 。

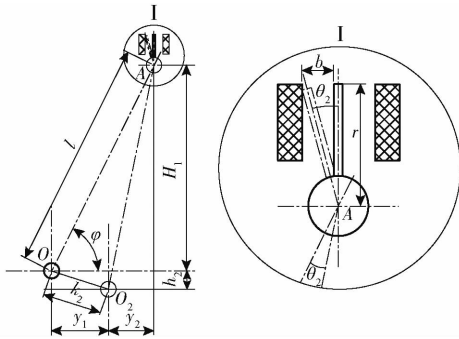


图 9 低地面侧播深监测装置运动分析

Fig. 9 Motion analysis of sowing depth monitoring device on low ground side

接触片到前触模块的距离 b 为

$$b = r \sin \theta_2 \quad (7)$$

其中

$$\theta_2 = \arccos \frac{2l^2 - k_2^2}{2l^2} \quad (8)$$

$$k_2 = \sqrt{y_1^2 + h_2^2} \quad (9)$$

$$y_1 = l \cos \varphi - y_2 \quad (10)$$

$$y_2 = \sqrt{l^2 - (H_1 + h_2)^2} \quad (11)$$

式中 θ_2 ——双 U 形架下摆最大有效角度, ($^\circ$)

k_2 ——地轮下降后最大有效轴心距, mm

y_1 ——地轮下降后最大有效水平距离, mm

y_2 ——地轮下降后地轮轴与连接轴水平距离, mm

结合图 6、8、9, 预设地面倾斜临界角度为 3° , 两侧地轮间距 $s = 2880$ mm, 地轮最大有效上升高度 h_1 和地轮最大有效下降高度 h_2 为

$$h_1 = h_2 = \frac{s}{2} \tan 3^\circ \quad (12)$$

经计算, $h_1 = h_2 = 75.47$ mm, 由于播深监测装置各构件已结合播种机整机尺寸设计, 双 U 形架有效运动长度 $l = 300$ mm, 双 U 形架与地面初始角度 $\varphi = 45^\circ$, 接触片转动半径 $r = 40$ mm, 综上可得, $a = 12.29$ mm, $b = 19.07$ mm。接触片与前、后触模块的距离参数会影响播深监测装置对倾斜地面适应性, 可根据不同地区地势情况进行调整。

3 试验

3.1 试验条件

为了验证 2BFGL-19 型播深自动调控稻麦联合播种机的播种性能, 以辉洋 2BFG-19 型播种机为基础, 集成播深调控装置、播深监测装置及液压传动及控制系统, 如图 10 所示。试验场地选取盐城市大丰区三龙镇丰富村试验田, 试验田环境温度 $15 \sim 17^\circ\text{C}$, 环境相对湿度 $30\% \sim 40\%$, 土壤类型为壤土, 试验田存在间断性倾斜路段。试验设备包括沃得奥龙 WD904 型拖拉机、便携式风速气象仪、电子秒表、钢直尺、钢卷尺、路面警示带、取样框 (250 mm \times 250 mm)、黑棉布、电子秤 (精确度 0.01 g) 等。沃得奥龙 WD904 型拖拉机主要性能参数如表 2 所示。试验种子选取扬麦 16, 千粒质量 37 g^[25-26]。



(a) 田间作业

(b) 系统布置

图 10 2BFGL-19 型试验样机

Fig. 10 2BFGL-19 test machine

1. 播深调控装置 2. 液压缸 3. 换向阀 4. 播深监测装置

3.2 试验方法及评价指标

试验依据标准 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》、NY/T 739—2003《谷物播种机械作业质量》和 JB/T 6274.1—2013《谷物播种机 第 1 部分: 技术条件》, 由于本研究旨在解决稻麦联合播种机播种深度不一致的问题, 播深自动调控系统会对试验机播种深度、均匀性和一致性等方面有影响, 所以分别设计规范性动态试验和田间试验进行实机验证。规范性动态试验为田间试验预试验, 以各行排

表2 沃得奥龙WD904型拖拉机主要技术参数

Tab.2 Main technical parameters of WD904 tractor

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 440×2 130×2 820
发动机功率/kW	66.2
转速/(r·min ⁻¹)	2 300
整机质量/kg	3 870
动力输出轴功率/kW	≥59
动力输出轴转速/(r·min ⁻¹)	760/1 000

种量一致性变异系数为评价指标,评估试验机性能的同时,寻求最佳试验条件,为正式试验提供参考。田间试验为正式试验,在最佳试验条件的基础上,选取往返行程中稳定作业段为检测区域,以播种深度合格率及播种均匀性变异系数为评价指标,检验试验机综合性能。试验对照原型机为辉洋2BFG-19型播种机,原型机检验结果如表3所示。

表3 辉洋2BFG-19型播种机检验结果

Tab.3 Test results of 2BFG-19 seeder %

检验项目	检验值	标准值
各行排种量一致性变异系数	3.62	≤3.9
播种深度合格率	77.78	≥75
播种均匀性变异系数	25.94	≤45

表4 各行排种量一致性试验结果

Tab.4 Test results of sowing amount consistency of each row

作业速度/ (m·s ⁻¹)	各行排种量/g									平均排种 量/g	变异系 数/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
0.6	49.13	48.25	50.51	50.58	50.23	48.61	48.15	47.23	52.33	49.45	3.21
0.8	65.33	64.12	67.34	65.78	67.95	61.72	62.12	64.25	65.34	64.88	3.24
1.0	80.46	81.05	86.23	86.86	81.78	87.69	81.37	80.98	80.44	82.98	3.62
1.2	98.65	104.31	106.52	95.36	102.89	98.57	98.98	104.48	104.16	101.55	3.68

3.4 田间试验

3.4.1 播种深度合格率试验

播种深度合格率体现播深自动调控系统性能。试验选取6个检测点,每个检测点同行等间隔测量9粒种子深度。在已完成播种的试验田里,正对双圆盘开沟装置位置挖开土层,以整地后的地面为基准面,测量每个种子上部土层的覆盖厚度,播种深度在(30±10)mm范围内为合格。

3.4.2 播种均匀性试验

播种均匀性表示检测区域整体播种分布均匀程度,评价指标为播种均匀性变异系数,变异系数越小,说明均匀性越好。试验选取试验田等间隔6行种带,每个种带取6段250mm×250mm检测区间,分别记录种子数量。采用实时跟踪检测,试验机拆除覆土装置,确保检测区域不覆土。

播种均匀性变异系数与各行排种量一致性变异

3.3 规范性动态试验

3.3.1 各行排种量一致性试验

各行排种量一致性表示试验机在播种时,每行排种量的接近程度,评价指标为各行排种量一致性变异系数,变异系数越小,说明一致性越好。试验机有17行排种口,等间隔测量9行,从左到右依次编号。试验机通过拖拉机驱动,预设作业速度分别为0.6、0.8、1.0、1.2m/s,单次试验时间30s,每次试验重复5次取平均值。

3.3.2 试验结果与分析

试验结果如表4所示,各作业速度下各行排种量一致性变异系数均小于3.9%,平均值为3.44%,小于原型机的检测结果3.62%,达到NY/T 739—2003要求,整机播种性能稳定。当作业速度为0.6、0.8m/s时,各行排种量一致性变异系数分别为3.21%和3.24%,一致性较好,当作业速度达到1.0m/s后,一致性变异系数接近临界值,各行排种量一致性下降。这是因为试验机作业到倾斜路段时,播深调控装置将带动双圆盘开沟装置倾斜来适应地面,如果作业速度较快,容易产生颠簸,影响了排种量一致性。为兼顾作业效率,田间试验选取作业速度为0.8m/s。

系数计算方法一致。

3.4.3 试验结果与分析

播种深度试验结果如表5所示,播种平均深度均在(30±10)mm范围内,总体播深合格率为87.04%,高于原型机检测结果77.78%,达到NY/T 739—2003要求,整机播种深度稳定。通过观察各行播深数据发现,两侧播深容易不合格,这是因为试验机作业到倾斜路段时,液压控制系统存在响应时间,播深调控装置在调整双圆盘开沟装置转动角度的过程中,两侧开沟器入土深度可能短暂无法达到要求,导致经开沟器落入土里的种子深度不合格。

播种均匀性试验结果如表6所示,各种带平均种数为31~33粒,整体排种稳定,播种均匀性变异系数最大值为24.13%,平均值为22.86%,小于原型机检测结果25.94%,达到JB/T 6274.1—2013要

表 5 播种深度试验结果
Tab.5 Test results of sowing depth

检测点 序号	各行播深/mm									平均播深/ mm	播种深度 合格点数	平均播深 合格率/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	25	18	28	32	30	33	25	25	42	28.67	7	87.04
2	42	38	35	38	35	28	27	23	28	32.67	8	
3	18	16	25	31	32	35	32	32	36	28.56	7	
4	33	35	32	28	30	36	29	32	34	32.11	9	
5	41	38	36	30	28	28	26	22	24	30.33	8	
6	30	32	33	27	25	28	22	16	25	26.44	8	

求,整机均匀性较好。造成上述结果原因为:原型机作业到倾斜路段时,可调双圆盘开沟装置与地面因倾斜接触导致受力不均匀,使得落种位置稍有偏差,从而影响了播种均匀性,而试验机受这种影响较小。

表 6 播种均匀性试验结果

Tab.6 Test results of sowing uniformity

种带 序号	各检测区间种数						平均 种数	变异系 数/%
	1	2	3	4	5	6		
1	26	36	40	28	35	20	31	24.13
2	24	29	39	24	30	38	31	21.40
3	38	34	37	22	22	30	31	23.44
4	22	32	32	42	28	38	32	21.93
5	39	42	28	22	32	35	33	22.19
6	42	23	35	37	27	25	32	24.07

4 讨论

长江中下游地区是我国稻麦种植的重要区域,地形包括平原和丘陵,地势起伏较大,导致播种机播种深度稳定性较差。本研究针对这一地区地形特点,以保障稻麦播种深度的稳定性为目标,设计了播深自动调控稻麦联合播种机。

与其他播种深度调控系统相比有不同之处。赵金辉等^[27]利用仿形轮和开沟器位置传感器计算实际播种深度,并通过四连杆机构实时调节,旨在改善保护性耕作地面机械播种的播深稳定性。SΦREN等^[28]通过位置传感器监测犁刀相对播种机框架的位置,再通过超声波高度传感器动态监测犁刀深度,两者结合计算实际播种深度并实时调节,解决了土壤阻力变化引起机械振动导致的播深不均匀问题。本研究针对长江中下游地区复杂多变的地形,相比平地,播深稳定性控制难度更大,因此播深调节装置的设计也完全不同。由于整机采用单液压缸系统一体式调控装置,且仅使用了两组传感器,相较于传统多缸或多传感器调控方案,新增成本较低,具有更好的推广意义。

播种深度监测系统能够对播种深度进行实时交互和过程监测。目前国内相关研究多围绕这类系统

的设计和试验展开^[29-30]。这些研究主要以角度、位置及超声波等传感器为触发端,通过 CAN 总线等电路进行数据监控并采集,最后将数据整理并显示在交互端。这类系统的主要作用是记录播种过程,更多体现在科学研究上。若要实现推广应用,还需与调控系统结合进行深入研究。本研究的播深监测装置未设置反馈机制,仅用于播深自动调节。若需实现视觉感知和过程记录,可增加反馈系统,但不建议采用每个开沟器布置传感器的方式,这不仅会增加成本,还会提高整机故障的风险。

总体而言,播深自动调控稻麦联合播种机能够适应复杂多变的地形,相比原型机,播种深度合格率从 77.78% 提高到 87.04%,播深稳定性显著提升。同时,根据表 4 和表 6 的数据,试验机在排种量一致性和播种均匀性方面也有一定提升。由此可见,本研究为稻麦精量播种研究提供了有益借鉴。

5 结论

(1)以辉洋 2BFG-19 型稻麦联合播种机为原型机,设计了 2BFGL-19 型播深自动调控稻麦联合播种机,可实时监测并自动调整播种深度。基于播深自动调控原理,完成了播深调控装置和播深监测装置的结构设计,搭建了液压传动及控制系统。通过对两侧播深监测装置运动分析,得到了地面倾斜与接触片至前、后触模块距离的关系,并以地面倾斜临界角度为 3° 的预设前提下,得到了接触片与前、后触模块的距离为 19.07 mm 和 12.29 mm。

(2)以各行排种量一致性变异系数为评价指标,开展了规范性动态试验。试验结果表明,当试验机作业速度为 0.6~1.2 m/s 时,各行排种量一致性变异系数均不超过 3.9%,整机播种一致性较好。为兼顾作业效率,当作业速度为 0.8 m/s 时,试验机各行排种量一致性变异系数为 3.24%,优于原型机的 3.62%,此速度段试验机具有较好的排种稳定性。

(3)以播种深度合格率及播种均匀性变异系数

为评价指标,开展了田间试验。试验结果表明,试验机播种深度合格率为87.04%,达到合格标准($\geq 75\%$),优于原型机(77.78%);试验机播种均匀性变异系数平均值为22.86%,达到合格标准($\leq 45\%$),优于原型机(25.94%)。试验机播种深度更稳定且播种更均匀,试验结果满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 徐春春,陆建飞. 长江中下游水稻生产波动特征及成因分析[J]. 中国农业资源与区划,2019,40(12):108-114.
XU Chunchun, LU Jianfei. Analysis of the fluctuation tendency and its potential contributing factors of rice production in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2019,40(12):108-114. (in Chinese)
- [2] 付浩,张学军,史增录,等. 滴灌区玉米精量免耕播种机设计与试验[J]. 新疆农业科学,2024,61(5):1094-1101.
FU Hao, ZHANG Xuejun, SHI Zenglu, et al. Design and experiment of corn precision no-till planter in drip irrigation area[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2024,61(5):1094-1101. (in Chinese)
- [3] 史增录,王美静,张学军,等. 折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):53-62.
SHI Zenglu, WANG Meijing, ZHANG Xuejun, et al. Design and test of folding cotton wide film spreading precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(8):53-62. (in Chinese)
- [4] 刘芳,高筱钧,贾宪,等. 高速精量播种机阿基米德螺旋型弧面双齿盘覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):91-100,120.
LIU Fang, GAO Xiaojun, JIA Xian, et al. Design and experiment of archimedean spiral-type arc double-toothed disc soil-covering device for high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):91-100,120. (in Chinese)
- [5] 张晋,薛亚光,刘旭杰,等. 2BFGK-12型稻茬麦集秸旋耕施肥播种机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2024,45(3):14-23.
ZHANG Jin, XUE Yaguang, LIU Xujie, et al. Design and experiment of gather straws rotary tillage fertilizer planter in 2BFGK-12 for wheat after rice seeder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2024,45(3):14-23. (in Chinese)
- [6] 赵鹏飞,巨晓腾,杨鹏琨,等. 肥管前置式小麦宽苗带旋耕施肥播种机设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(20):12-21.
ZHAO Pengfei, JU Xiaoteng, YANG Pengkun, et al. Design and experiment of fertilizer pipe front-mounted wheat wide seedling belt rotary tillage fertilization planter[J]. Transactions of the CSAE,2024,40(20):12-21. (in Chinese)
- [7] 印祥,杨腾祥,金诚谦,等. 玉米精量播种智能控制系统研制[J]. 农机化研究,2018,40(9):125-128,133.
YIN Xiang, YANG Tengxiang, JIN Chengqian, et al. Development of an intelligent control system for precision corn seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(9):125-128,133. (in Chinese)
- [8] 夏俊芳,魏有帅,郑侃,等. 宽苗带小麦播种机多行匀播分控系统设计及试验[J]. 农业机械学报,2024,55(10):145-156.
XIA Junfang, WEI Youshuai, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of multi-row uniform seeding control system for wide-row wheat seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(10):145-156. (in Chinese)
- [9] 韩长杰,刘钊,毛罕平,等. 棉田变量施肥整地联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(11):250-261,284.
HAN Changjie, LIU Zhao, MAO Hanping, et al. Design and experiment of variable rate fertilization combined soil preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(11):250-261,284. (in Chinese)
- [10] 丁幼春,陈礼源,王登辉,等. 油菜播种质量监测系统设计与试验[J]. 华南农业大学学报,2021,42(6):43-51.
DING Youchun, CHEN Liyuan, WANG Denghui, et al. Design and test of monitoring system for rapeseed sowing quality[J]. Journal of South China Agricultural University,2021,42(6):43-51. (in Chinese)
- [11] 孟杰,高锰. 基于集成电路的花生精量播种机电气系统设计[J]. 农机化研究,2023,45(5):72-77.
MENG Jie, GAO Meng. Design of electrical system of peanut precision seeder based on integrated circuit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(5):72-77. (in Chinese)
- [12] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2022,53(4):1-20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):1-20. (in Chinese)
- [13] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2020,51(1):1-18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):1-18. (in Chinese)
- [14] 闫锦涛,冯利平,李扬,等. 播期和播深对冬小麦越冬前生长性状的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(2):327-335.
YAN Jintao, FENG Liping, LI Yang, et al. Effects of sowing date and sowing depth on winter wheat growth before overwintering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):327-335. (in Chinese)
- [15] NEMERGUT K, THOMISON P, CARTER P, et al. Planting depth affects corn emergence, growth and development, and

- yield[J]. *Agronomy Journal*,2021,113(4):3351-3360.
- [16] 王永健,高涵,李骅,等. 大蒜四行播种机播种监测系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报,2024,45(4):598-607.
WANG Yongjian, GAO Han, LI Hua, et al. Design and testing of a seeding monitoring system for four-row garlic planter[J]. *Journal of South China Agricultural University*,2024,45(4):598-607. (in Chinese)
- [17] 闫荆,朱龙图,于婷婷,等. 免耕播种机播种深度实时监测系统[J]. 农机化研究,2016,38(09):214-218.
YAN Jing, ZHU Longtu, YU Tingting, et al. Seeding depth real-time monitoring system for a no-till planter[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*,2016,38(09):214-218. (in Chinese)
- [18] 王淞,衣淑娟,赵斌,等. 基于 IWHO-EKF 的高速免耕播种机播种深度监测系统研究[J]. 农业机械学报,2024,55(3):75-84.
WANG Song, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. High-speed no-till seeder seeding depth monitoring system based on IWHO-EKF[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2024,55(3):75-84. (in Chinese)
- [19] WEN Liping, FAN Xiongfei, LIU Zhao, et al. The design and development of the precision planter sowing depth control system[J]. *Sensors&Transducers*, 2014, 162(1):53-58.
- [20] NIELSEN S, NORREMARK M, GREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127:690-698.
- [21] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J]. 农业机械学报,2015,46(4):1-8.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(4):1-8. (in Chinese)
- [22] 杜小强,宁晨,杨振华,等. 跨式油茶果收获机履带底盘行走液压系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):139-147.
DU Xiaoqiang, NING Chen, YANG Zhenhua, et al. Design and experiment of hydraulic system for crawler chassis of straddle type camellia oleifera fruit harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2023,54(3):139-147. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 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)
- [25] 王慧,朱冬梅,王君婵,等. 扬麦 16 耐迟播早熟特性研究[J]. 麦类作物学报,2016,36(12):1657-1666.
WANG Hui, ZHU Dongmei, WANG Junchan, et al. Study on the early maturing characteristics of Yangmai 16 under late planting[J]. *Journal of Triticeae Crops*,2016,36(12):1657-1666. (in Chinese)
- [26] 陈俊才,汤顺英,孙敬东,等. 播期与密度对扬麦 16 号子粒产量和生育期及抗逆性的影响[J]. 作物杂志,2007(5):34-36.
- [27] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 播种机开沟深度控制系统的设计与室内试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):35-41.
ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(6):35-41. (in Chinese)
- [28] SΦREN K N, LARS J M, MATHIEU L,等. 播种机精密播种深度控制系统[J]. 中国农机化学报,2021,42(11):30-36.
SΦREN K N, LARS J M, MATHIEU L, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*,2021,42(11):30-36. (in Chinese)
- [29] 高原源,翟长远,杨硕,等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J]. 农业机械学报,2020,51(6):15-28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2020,51(6):15-28. (in Chinese)
- [30] 高原源,王秀,杨硕,等. 基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究[J]. 农业机械学报,2019,50(12):23-32.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2019,50(12):23-32. (in Chinese)