

玉米高速免耕播种机液压主动仿形机构设计与试验

衣淑娟¹ 李怡凯¹ 李衣菲¹ 陈涛¹ 孙亭瀚¹ 杨宏宇²

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319;

2. 黑龙江北大荒现代农业服务集团众荣农机有限公司, 哈尔滨 150030)

摘要:为解决玉米免耕播种机在高速作业下播深一致性较差的问题,设计一种可调节液压仿形机构,并通过补偿调节的方式实现高精度的同步仿形。应用 ANSYS 软件对液压仿形机构进行静力学分析,求得液压缸初始伸出量与液压仿形机构最大应力应变之间的关系,分析结果表明,在伸出量 30、40、50、60、70 mm 下,随着液压缸初始伸出量的增大,液压仿形机构最大应力显著降低、最大应变逐渐增加。为初步检验液压仿形机构作业性能,验证所设计滑动调节机构对其作业适应性的提升效果,使用播种单体仿形性能检测试验台,以液压缸初始伸出量和作业速度为试验因素,以上下仿形平均误差比、仿形平均误差、平均调节时长为试验指标,进行二因素五水平二次正交旋转组合试验。试验得出:当作业速度为 12.3 km/h 时,滑动调节机构对调节精度的提升效果最佳,最大可使调节误差降低 18.99%,当作业速度为 14.8 km/h 时,滑动调节机构对调节速度的提升效果最佳,最大可使调节时长缩短 16.11%,通过滑动调节机构可使得不同作业速度下仿形平均误差小于等于 2.02 mm、调节时长小于等于 0.29 s,满足设计要求。此外,为进一步验证液压仿形机构综合仿形性能,进行田间对比试验,结果表明:装备该液压仿形机构的播种单体播深合格率为 94.8%,播深最大变异系数为 6.12%,各项指标均满足玉米播种农艺要求。

关键词: 玉米; 高速免耕播种机; 液压仿形机构; 液压系统

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0110-11

OSID:



Design and Test of Hydraulic Active Profiling Mechanism for High-speed No-till Corn Planter

YI Shujuan¹ LI Yikai¹ LI Yifei¹ CHEN Tao¹ SUN Tinghan¹ YANG Hongyu²

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. Heilongjiang Beidahuang Modern Agricultural Service Group Zhongrong Agricultural Machinery Co. Ltd., Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor seeding depth consistency of no-till corn planter under high-speed operation environment, an adjustable hydraulic profiling mechanism was designed, which realized high-precision synchronous profiling by means of compensation adjustment. The application of ANSYS software on the hydraulic profiling mechanism for static analysis was carried out, to find the initial extensions of the hydraulic cylinder and hydraulic profiling mechanism of the maximum stress-strain value of the relationship between the analysis results showed that, in the 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm and 70 mm extensions, with the increase of the initial amount of the hydraulic cylinder installation, the hydraulic profiling mechanism of the maximum stress value of a significant reduction in the maximum strain value was gradually increased. In order to preliminarily test the operational performance of the hydraulic profiling mechanism and verify the enhancement effect of the designed sliding adjustment mechanism on its operational adaptability, a two-factor, five-level quadratic orthogonal rotary combination test was conducted by using the pitching seeding unit profiling performance testing bench with the initial extensions of hydraulic cylinders and the operational speed as the test factors, and the ratio of the upper and lower profiling average error, the profiling average error, and the average adjustment time as the test indexes. When the operating speed was 12.3 km/h, the sliding adjustment mechanism had the best effect

收稿日期: 2024-01-11 修回日期: 2024-03-27

基金项目: 北大荒农垦集团有限公司 2023 年农机研发制造推广应用一体化试点项目、黑龙江省重点研发计划重大项目 (2022ZX05B02-02) 和黑龙江省“百千万”工程科技重大专项支撑行动计划项目 (2020ZX17B01-3)

作者简介: 衣淑娟 (1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事玉米播种机械研究, E-mail: yishujuan_2005@126.com

on the improvement of adjustment accuracy, and it can reduce the adjustment error by 18.99%; when the operating speed was 14.8 km/h, the sliding adjustment mechanism had the best effect on the improvement of adjustment speed, and it can shorten the adjustment time by 16.11%; and by sliding adjustment mechanism, the average error of the mimicry under different operating speeds was not more than 2.02 mm, and the average error of the mimicry at different operating speeds was not more than 0.29 s, which met the design requirements. In addition, in order to further verify the comprehensive profiling performance of the hydraulic profiling mechanism, the field comparison test was conducted, and the results showed that the qualified rate of seeding depth of the seeding unit equipped with the hydraulic profiling mechanism was 94.8%, and the maximum coefficient of variation of seeding depth was 6.12%, and all the indexes met the requirements of agronomy for corn seeding.

Key words: corn; high-speed no-till planter; hydraulic profiling mechanism; hydraulic system

0 引言

播种深度是玉米播种机播种质量的重要指标,播深一致性差会导致种子出土时间不一,扩大不同植株间果穗数和干物质积累量间的差距,还会使种子更易受土壤病原菌和害虫的影响^[1-6]。严重时,可能导致种子因为土壤墒情过低或含氧量不足而无法萌发,并最终影响玉米产量与质量^[7-8]。

仿形机构是玉米播种机的关键部件,通过仿形机构的调节可以稳定开沟深度,从而提高播深一致性。仿形机构主要分为机械仿形与液压仿形,目前国内运用最为广泛的是机械仿形,这种被动的仿形方式组成简单、安装调整便利,但仿形精度较差^[9-10]。机械仿形以弹簧仿形为主,一般具有多个安装挡位,可根据作业地形调节挡位,改变弹簧拉伸长度以控制播种单体下压力,作业环境适应性较好。随着现代农业的发展,被动仿形在应对高速作业环境下大幅度、高频率的地面起伏时,难以保证调节精度,尤其是保护性耕作技术发展以来,田间秸秆残茬覆盖量大大增加,播种单体依靠被动仿形无法获得足够的下压力^[11]。主动仿形在补足播种单体下压力的同时,可以进行播深实时控制,因此逐渐成为当前仿形机构的重点研究内容^[12-18]。

国外学者在 20 世纪 70 年代开展了主动仿形技术研究^[19]。但随着播种作业速度与精度要求的不断提高,主动仿形研究仍存在调节滞后、作业环境适应性较差等问题^[20-23]。

基于此,本文结合被动仿形多挡调节以及主动仿形实时控制的特点,设计一种可调节的高精度主动仿形机构。通过在液压缸铰接点上添加滑动调节机构的方式,实现液压缸初始伸出量无级调节,从而根据作业地面实际起伏情况改变仿形机构仿形量、调节精度以及调节速度等作业参数,使主动仿形机构始终保持良好的工作性能,提高其作业环境适应性。将播深

调节过程分为预调节和精量调节 2 个阶段,采用补偿调节的方法,对播深进行二次调节,使播种单体可在高速作业中实现高精度的同步仿形。利用自主研发的俯仰式播种单体仿形性能检测试验台,通过二次正交旋转组合试验探究影响仿形性能的因素,检验滑动调节机构对液压仿形机构作业适应性的提升效果,并结合田间对比试验进一步验证该液压仿形机构工作性能,以期为主动仿形技术优化设计提供参考^[24]。

1 仿形机构结构与工作原理

1.1 玉米高速免耕播种机液压仿形机构结构

液压仿形机构主要由仿形机构、液压系统、起伏监控系统、滑动调节机构组成,如图 1 所示。

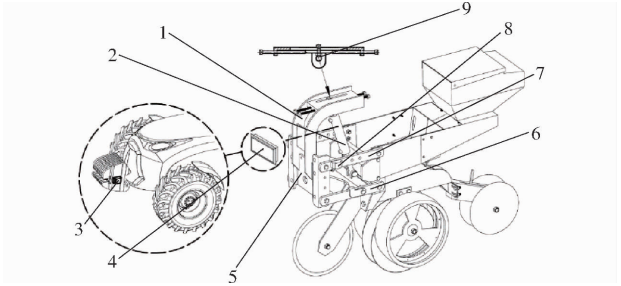


图 1 玉米高速免耕播种机液压仿形机构结构简图

Fig. 1 Structural sketch of hydraulic profiling mechanism of high-speed no-till corn planter

1. 固定板 2. 液压缸 3. 车头角度传感器 4. 车载计算机 5. 支架 6. 平行下杆 7. 平行上杆 8. 播种单体角度传感器 9. 调节滑块

液压系统主要由液压缸、液压泵以及液压元件组成;起伏监控系统主要由车载计算机、车头角度传感器以及一组播种单体角度传感器组成;滑动调节机构主要由固定板、调节滑块组成。液压缸上端与滑动调节机构调节滑块铰接,液压缸下端与仿形机构下仿形杆铰接,滑动调节机构固定板焊接在仿形机构支架上。车头角度传感器固定在拖拉机拖车装置,播种单体角度传感器固定在平行上杆,车载计算机安装在拖拉机驾驶室内。本设计以德邦大为

1205 型牵引式免耕精量播种机为研究对象,播种机关键性能参数如表 1 所示。

表 1 玉米高速免耕播种机关键性能参数
Tab.1 Key performance parameters of high-speed no-till corn planter

参数	数值
工作幅宽/mm	1 900
播种行数	2
播种深度/mm	30 ~ 100
最高作业速度/(km·h ⁻¹)	16
排种器数量	2

1.2 液压仿形机构工作原理

仿形机构仿形量分为上仿形量与下仿形量,

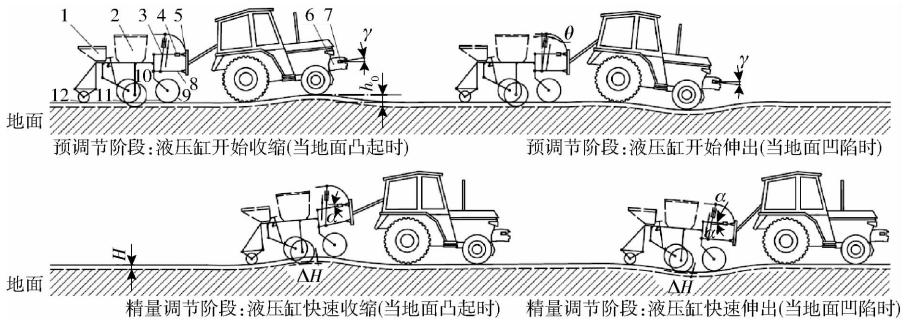


图 2 玉米高速免耕播种机液压仿形机构工作原理图
Fig.2 Working schematic of high-speed no-till corn planter hydraulic profiling mechanism
1. 肥箱 2. 种箱 3. 液压缸 4. 播种单体角度传感器 5. 滑动调节机构 6. 拖车装置 7. 车头角度传感器 8. 仿形机构 9. 破茬刀 10. 开沟盘 11. 限深轮 12. 镇压轮

图 2 中, H 为预设播种深度 (mm), ΔH 为播深误差 (mm), h_0 为地面起伏量 (mm), α 为四杆机构仿形角, ($^\circ$), γ 为车头倾斜角, ($^\circ$), θ 为液压缸不同初始伸出量下的安装倾斜角, ($^\circ$)。

播种机工作过程中遇到凸起的地面时:拖拉机前轮受地形影响,以后轮为旋转中心,逆时针向上倾斜。位于车头的角度传感器采集到车头倾斜角 γ , 结合拖拉机轴间距 2 370 mm、轴线夹角 4.5 $^\circ$,可初步计算地面起伏量 h_0 ,公式为

$$h_0 = 2\,370\sin 4.5^\circ + 2\,370\sin (\gamma - 4.5^\circ) = 185.95 - 2\,370\sin (\gamma - 4.5^\circ) \quad (1)$$

因此,可结合式(1)将角度传感器采集到的车头倾斜角 γ ,以区间转换方式直接快速地转换为预调节收缩量,从而避免出现调节过度的情况。收缩量由车载计算机传递给液压缸中的电磁换向阀,从而控制液压缸收缩进行预调节,预调节伸缩量转换如表 2 所示。

液压缸收缩过程中,液压仿形机构运用平行四边形的运动特点使单体上升以完成向上仿形,上升速度与作业速度正相关。由于重量差异等原因,拖拉机与播种单体经过同一地块时起伏角存在差异,

其中,上仿形量表示仿形机构可使播种单体向上仿形位移,下仿形量表示仿形机构可使播种单体向下仿形位移^[25]。播种机工作前,根据作业环境与作业要求选择液压缸活塞杆初始伸出量,通过旋转螺栓移动调节滑块,改变液压仿形机构静止状态下液压缸初始伸出量,以分配液压仿形机构的上、下仿形量。在作业地块田间秸秆残茬覆盖量较大或地面下陷较大时,调节滑块靠后固定,此时液压缸初始伸出量较小、下仿形量大、调节精度高;在作业地块土质松软或地面前上升高度较大、作业速度较快时,调节滑块靠前固定,此时液压缸初始伸出量较大、上仿形量大、调节速度快。液压仿形机构工作原理如图 2 所示。

表 2 液压缸预调节伸缩量转换表
Tab.2 Hydraulic cylinder pre-adjustment expansion conversion

车头倾斜角/($^\circ$)	液压缸预调节伸缩量/mm
< -1.50	-50
$-1.50 \sim -0.75$	-25
$-0.75 \sim 0.75$	0
$0.75 \sim 1.50$	25
> 1.50	50

因此需进行二次调节。当播种单体限深轮到达起伏点后,开沟圆盘开沟深度变深,播种单体绕仿形杆前铰链点逆时针向上倾斜,位于仿形机构的角度传感器采集到仿形角 α ,车载计算机结合仿形机构连架杆长度 315 mm、四连杆机构与实际水平面的高度差 2.5 mm,通过测量模型精确计算地面起伏量 h_0 ,公式为

$$h_0 = 315\sin \alpha - 2.5 \quad (2)$$

车载计算机将计算出的实际起伏量传递给液压缸中的电磁换向阀,控制液压缸快速收缩,补偿调节量并完成精量调节。

同理,播种机工作过程中遇到凹陷地面时:拖拉

$r_P、r_K、r_S、r_Z$ ——破茬刀、开沟盘、限深轮和镇压轮半径,mm

限深轮所受的阻力将直接影响仿形的精度和播深的准确,由式(4)~(6)可推导限深轮所受的阻力 F_S 计算公式为

$$F_S = \sqrt{F_{Sx}^2 + F_{Sy}^2} = \sqrt{1 + \mu^2} \cdot \frac{G - F_{Py}(1 + f_1 \tan \alpha) - F_{Ky}(1 + f_2 \tan \alpha) - F_{Zy}(1 + f_3 \tan \alpha)}{1 + \mu \tan \alpha} \quad (7)$$

由式(7)可见,仿形限深轮所受的阻力与重力 G 、仿形角 α 和破茬刀、开沟盘、镇压轮的工作阻力等有关,当播种单体重固定时,随着破茬刀、开沟盘、镇压轮的工作阻力以及仿形角的增加,仿形限深轮受到的阻力减小。相反,随着破茬刀、开沟盘、镇压轮的工作阻力以及仿形角的减小,仿形限深轮所受的阻力变大。因此,需要保证开沟部件在作业过程中的稳定性,以确保播深的一致性。

2.2 液压系统设计

德邦大为 1205 型免耕精量播种机播种单体质量约为 120 kg,结合单体质量,选用双耳环液压缸,液压缸安装尺寸 320 mm、行程 100 mm、外径 68 mm、内径 50 mm,活塞杆直径 25 mm。液压系统额定压力取 10 MPa,则液压缸产生的最大举升力 $F_{\max}$ 为 19.63 kN,可以提升播种单体,满足设计需求。

液压系统主要由节流阀、三位四通电磁换向阀、液压泵站、单向阀、油箱、先导式电磁溢流阀组成,原理如图 4 所示。

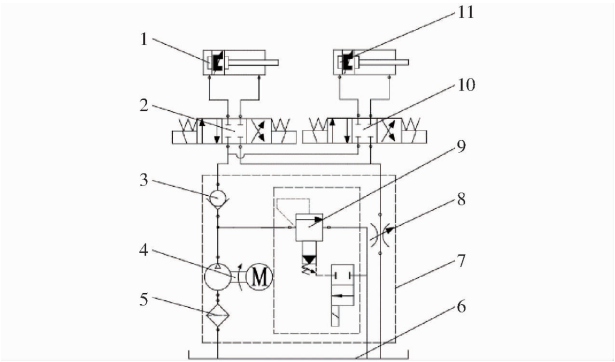


图 4 液压仿形机构液压系统原理图
Fig. 4 Hydraulic system schematic of hydraulic profiling mechanism

1. 液压缸 a 2. 三位四通电磁换向阀 a 3. 单向阀 4. 变量泵
5. 过滤器 6. 油箱 7. 液压泵站 8. 节流阀 9. 先导式电磁溢流阀 10. 三位四通电磁换向阀 b 11. 液压缸 b

当拖拉机或播种单体遇到地面起伏时,角度传感器采集到的信息经由计算机处理后转换为液压杆调节信息并向液压元件输送。液压系统开始运作:变量泵启动,液压油从油箱经由过滤器吸入变量泵,

当进油口压力达 0.04 MPa,单向阀启动,液压油进入三位四通电磁换向阀。当进油口压力达 10 MPa,先导式电磁溢流阀启动,控制进油路压力。三位四通电磁换向阀对液压油流进行接通、切断和换向,以控制液压杆的伸出、静止和缩回。节流阀控制回油路流量,以稳定出油路压力。通过各个液压元件的相互配合,实现对播种单体播深的实时控制。控制系统流程如图 5 所示。

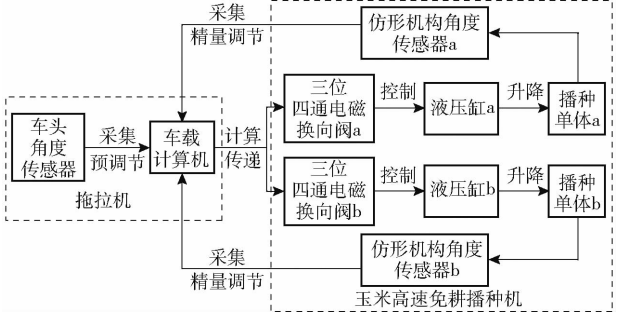


图 5 液压仿形机构控制系统流程图
Fig. 5 Hydraulic profiling mechanism control system flowchart

图 5 中,拖拉机角度传感器与液压系统通过补偿延迟时间的方法实现同步仿形,避免仿形滞后的关键在于:液压缸需要仿形过程中快速升降与及时调节,因此系统液压流量要求应在 15 L/min 以上,则有

$$Q = q_0 n \eta_v \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中 Q ——系统流量,取 10 L/min
 q_0 ——泵排量, mL/r
 n ——泵转速,取 1 800 r/min
 η_v ——容积效率,取 0.85

计算可得泵的计算排量为 9.8 mL/r,所以选取泵的公称排量为 10 mL/r,可得出实际工作中系统流量 $Q = 15.3$ L/min。

已知拖拉机前轮与播种单体限深轮距离为 5 200 mm,按照播种机作业速度 16 km/h 计算,当车头角度传感器采集到角度变化并将目标伸缩量传递给液压系统后,预调节与精量调节间隙时间 t 计算公式为

$$t = \frac{5.2 \times 60 \times 60}{1\,000v} = \frac{18.72}{v} \quad (9)$$

式中 v ——播种机作业速度,km/h

计算可得,液压缸需在 1.17 s 内将单体调整为合适高度,完成预调节。液压缸最大工作速度 v_h 计算公式为

$$v_h = \frac{Q}{60Z\pi \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] \times 10^{-3}} \quad (10)$$

式中 Z ——液压缸数量,取 2

D ——液压缸内径,mm
 d ——活塞杆直径,mm

将 $D = 50\text{ mm}$ 、 $d = 25\text{ mm}$ 代入式 (10) 计算得 $v_h = 0.087\text{ m/s}$,以预调节最大区间调节量为例,当液压缸目标伸缩量为 50 mm 时,该液压系统所需时间为 0.58 s ,满足速度需求。

2.3 滑动调节机构设计与静力学分析

2.3.1 滑动调节机构设计

液压仿形机构调节装置主要由固定板和调节滑块组成,调节滑块与液压缸上端铰接并通过螺栓固定在固定板上,固定板设计为无级调节,当调节滑块固定在不同位置时,液压缸的初始伸出量也会产生变化,进而影响液压仿形机构的上仿形量、下仿形量、总仿形量、调节速度、调节精度等。因此,需计算液压缸不同安装伸出量下的仿形参数。

总仿形量是仿形机构的关键设计参数,通常用 h 表示,单位为 mm。总仿形量又分为上仿形量 h_1 与下仿形量 h_2 。通常, h_1 、 h_2 为 $80 \sim 120\text{ mm}$,作业地块的实际情况不同,上、下仿形量需求也不同,可通过滑动调节机构进行改变与分配^[26]。因此,需求得液压缸初始伸出量与仿形机构仿形量之间的关系式,以确定固定板调节范围。高速免耕播种机液压仿形机构调节机构状况如图 6 所示。

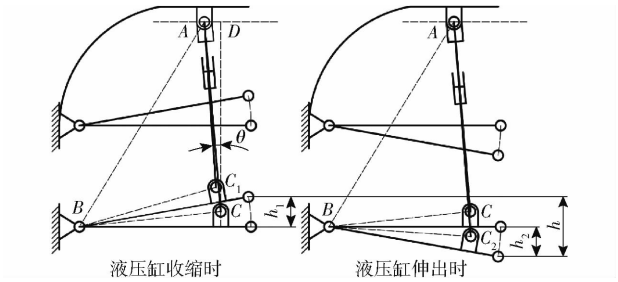


图 6 液压仿形机构滑动调节机构状态
Fig.6 Hydraulic profiling mechanism sliding adjustment mechanism status

图 6 中,点 A 为液压缸与调节滑块的铰链点,随着调节滑块的水平移动而变化;点 B 为下仿形杆与支架的铰链点,为固定点;点 C 为液压缸与平行下杆铰链点在初始水平时所在位置,为固定点;点 D 为点 C 在点 A 轨迹线上的垂点;点 C_1 为液压缸完全收回时平行下杆铰链点所在位置;点 C_2 为液压缸完全伸出时平行下杆铰链点所在位置。结合图 6 中几何关系可知 l_{AC} 与 l_{AB} 的计算公式分别为

$$l_{AC} = l_{AC_1} + l = \frac{l_{CD}}{\cos\theta} \tag{11}$$

$$l_{AB} = \sqrt{l_{BC}^2 + l_{AC}^2 - 2l_{BC}l_{AC}\cos(96^\circ - \theta)} \tag{12}$$

结合反三角函数公式可知

$$\begin{cases} h_1 = \sin\left(\arccos\frac{l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - l_{AC}^2}{2l_{AB}l_{BC}} - \arccos\frac{l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - l_{AC_1}^2}{2l_{AB}l_{BC}}\right)l_f \\ h_2 = \sin\left(\arccos\frac{l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - l_{AC_2}^2}{2l_{AB}l_{BC}} - \arccos\frac{l_{AB}^2 + l_{BC}^2 - l_{AC}^2}{2l_{AB}l_{BC}}\right)l_f \end{cases} \tag{13}$$

式中 l ——液压缸伸出量,mm
 l_{CD} ——点 C 与点 D 距离,取 310 mm
 l_{BC} ——点 B 与点 C 距离,取 280 mm
 l_{AC_1} ——液压缸全缩状态下铰链点距离,即液压缸安装尺寸,取 320 mm
 l_{AC_2} ——液压缸全伸状态下铰链点距离,取 420 mm

将数值代入式 (11) ~ (13) 并整理可得各个仿形参数之间的关系,结合播种机作业速度与大型农场田间起伏信息,设计调节滑动机构可使液压缸初始伸出量调节范围为 $30 \sim 70\text{ mm}$,液压缸安装倾斜角 θ 调节范围为 $27.7^\circ \sim 37.4^\circ$,此时,播种单体的仿形角 α 为 $-16^\circ \sim 16^\circ$ 。以液压缸初始伸出量 30 、 40 、 50 、 60 、 70 mm 为例,计算结果见表 3。

表 3 液压仿形机构不同液压缸初始伸出量下的仿形参数
Tab.3 Profiling parameters of hydraulic profiling mechanism with different initial extension of hydraulic cylinders

液压缸初始伸出量/mm	液压缸安装倾斜角/(°)	上仿形量/mm	下仿形量/mm	总仿形量/mm
30	27.7	39.1	92.8	131.9
40	30.6	53.2	82.3	135.5
50	33.1	65.5	70.4	135.9
60	35.3	79.4	56.7	136.1
70	37.4	93.8	44.2	138.0

计算结果显示,随着液压缸初始伸出量的增加,液压缸安装倾斜角增加、上仿形量增加、下仿形量减小。此外,由于液压缸安装倾斜角的增加,总仿形量也逐渐增加,因此,调节速度变快,调节精度降低。大型农场作业田地较为平整,当地块整体起伏较小或秸秆残茬覆盖量较大、凹陷较多时,调节滑块靠后固定以提高下仿形量以及调节精度;当地块整体起伏较大或土质较为松软、凸起较多时,调节滑块靠前固定以提高上仿形量与调节速度。

2.3.2 滑动调节机构静力学分析

高速免耕播种机液压仿形机构受力情况复杂,需在播种机高速作业的同时频繁升降单体,因此在

高速工作过程中会产生应力应变。通过静力学分析可以得出液压仿形机构的最大应力应变及其所在的区域,从而分析液压仿形机构设计的合理性并校核材料强度。此外,通过比较液压缸不同初始伸出量下的液压仿形机构的最大应力、应变,可以探究两者之间的关系。图 7 为液压仿形机构简化后的三维模型。

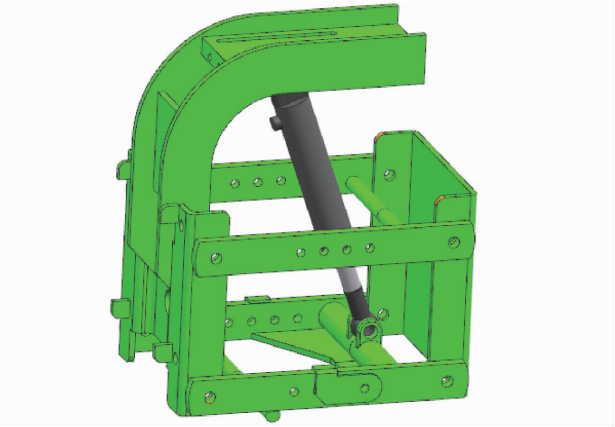


图 7 液压仿形机构简化三维模型

Fig. 7 Simplified 3D model of hydraulic profiling mechanism

将该模型导入 ANSYS Workbench 2022 软件中,设置工程数据,选择材料为结构钢,划分并细化网格。以液压缸初始伸出 50 mm 状态下的模型为例,共划分网格单元 569 182 个,节点 863 407 个,具体网格图像如图 8 所示。

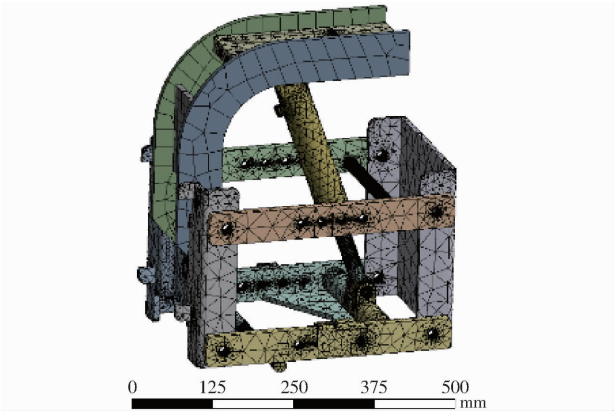


图 8 液压仿形机构网格划分图

Fig. 8 Hydraulic profiling mechanism meshing

根据单体自重与液压仿形机构工作时的受力情况,在液压缸上铰链点处沿着液压缸方向添加两个合计 3 200 N 的矢量力,在支架位置设置固定支撑,并进行静力学的求解。求出等效应变云图与等效压力云图,如图 9 所示。

由图 9 可知,液压仿形机构最大应力区域出现在液压缸与平行下杆连接位置,最大应力为 130. 29 MPa,出现于该位置的主要原因是该部分区

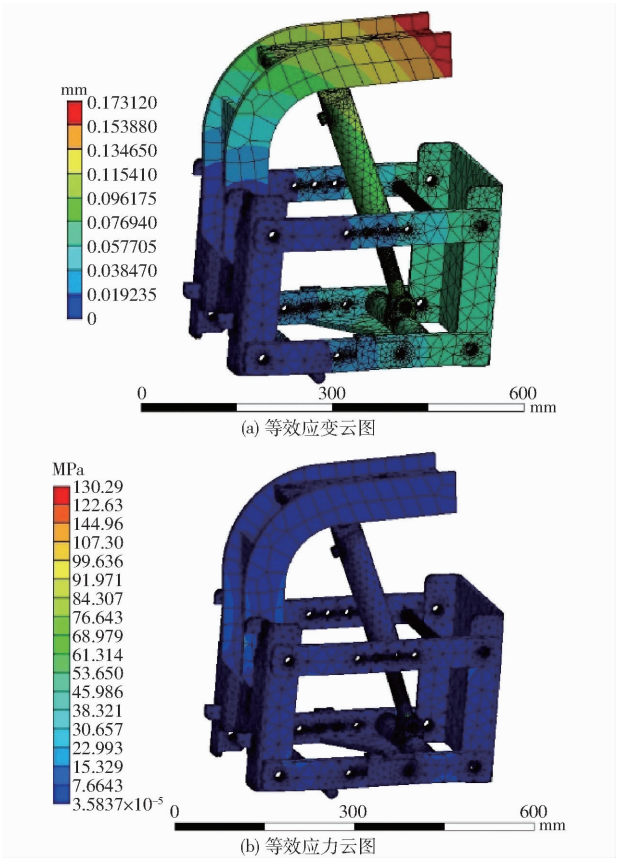


图 9 液压仿形机构静力学分析结果

Fig. 9 Hydraulic profiling mechanism hydrostatic analysis results

域受到单体以及液压力,受力区域集中,受力情况复杂;液压仿形机构的最大变形处位于调节滑块附近,主要原因是该区域受到大部分单体重力以及液压力,最大变形量为 0. 173 12 mm。

以同样的方法,分别对液压缸初始伸出量 30、40、60、70 mm 状态下的液压仿形机构进行静力学分析,结果如图 10 所示。

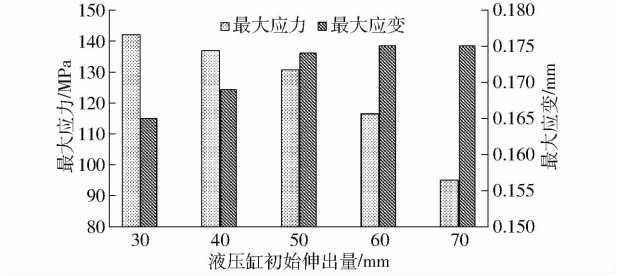


图 10 不同液压缸初始伸出量下最大应力、应变

Fig. 10 Maximum stress-strain values for different initial extensions of hydraulic cylinders

结果表明,在液压缸初始伸出量 30、40、50、60、70 mm,液压仿形机构最大应力随伸出量的增加而显著降低,当伸出量为 30 mm 时应力最大,为 141. 84 MPa;液压仿形机构最大应变随伸出量的增加而缓慢增加,在 70 mm 时应变最大,为 0. 175 63 mm。

材料强度始终满足最大应力、应变,因此液压仿形机构结构设计合理。

3 试验

3.1 评价指标

液压仿形机构的试验评价指标参考行业标准 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》的相关规定,分别为仿形性能台架试验指标与田间对比试验指标。仿形性能台架试验指标为:液压仿形机构在台架试验中,能适应台架模拟出的不同作业速度下的作业地形,且配合滑动调节机构调节出的不同速度下最佳液压缸初始伸出量,应保持仿形平均误差小于等于 10 mm、调节时长小于等于 0.35 s。田间对比试验指标为:液压仿形机构在田间试验中,作业效果明显优于自重仿形与弹簧仿形,且播种深度合格率大于等于 75%。

3.2 试验设备

为验证液压仿形机构调节性能,使用自主研制的俯仰式播种单体仿形性能检测试验台进行试验,该试验台主要由高速传动系统、液压升降系统、传感器监控系统组成,如图 11 所示。

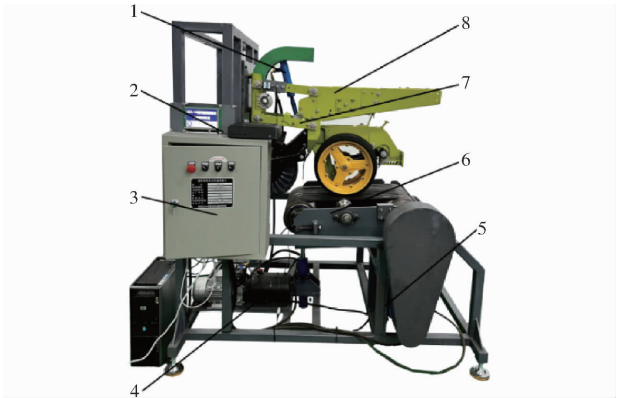


图 11 俯仰式播种单体仿形性能检测试验台
Fig. 11 Pitching seeding unit profiling performance testing bench

1. 液压仿形机构 2. 计算机 3. 控制箱 4. 液压泵 5. 电机
6. 高速俯仰平台 7. 仿形机构 8. 播种单体

试验前,采用 RTK - GNSS 对黑龙江八一农垦大学试验示范田 (125°09′57.6″ ~ 125°10′8.4″E、46°34′51.6″ ~ 46°35′9.6″N) 同一地块进行测量,采集的不同速度下的地形数据以文本形式输入计算机。试验台监控系统会根据目标信息,使高速传动系统达到对应速度的同时控制液压升降系统还原目标起伏曲线,从而实现模拟播种单体在前进作业时遇到的地面起伏效果。同时,监控系统中的传感器将实时采集台架模拟起伏量、仿形机构调节量等数据并显示在屏幕上,两者的差值即为液压仿形机构

仿形误差,仿形误差可以直观展现高速免耕播种机液压仿形机构的调节精度,仿形机构调节量与模拟起伏量到达峰值时的时间差即为液压仿形机构调节时长,调节时长可以直观展现高速免耕播种机液压仿形机构的调节速度。

3.3 试验方法

仿形性能台架试验于 2023 年 8 月在黑龙江八一农垦大学播种实验室进行。试验开始前,将装配液压仿形机构的德邦大为 1205 型免耕播种机播种单体固定在试验台上,并将角度传感器固定在播种单体平行上杆。向试验台计算机输入目标作业速度下的曲线文本,试验台开始模拟作业环境。位于传输平台和播种单体仿形机构上的传感器以频率 8 Hz 分别采集台架模拟起伏量以及仿形机构调节量,结果以图表形式输出。对比台架试验数据需提前进行预调节,通过式(9)计算出对应速度下的调节间隙,提前控制液压仿形机构进行基于模拟地面起伏曲线的预调节。

仿形机构在通过精量调节后的最终调节量与同一时间下的台架模拟起伏量对比所得差值即为仿形量误差 Δh (mm),根据液压缸伸缩可分为上仿形量误差 Δh_1 (mm) 与下仿形量误差 Δh_2 (mm)。以 5 s 为一个调节区间,同一调节区间内仿形机构调节量与模拟起伏量到达同一起伏曲线极值时所需时间差即为调节时长 Δt (s),首尾区间作为加速段与减速段不计入台架试验数据。

选取作业速度、液压缸初始伸出量为试验因素,将上、下仿形量平均误差比值、仿形平均误差以及平均调节时长作为试验的评价指标,其中,上仿形量平均误差 $\overline{\Delta h_1}$ (mm) 与下仿形量平均误差 $\overline{\Delta h_2}$ (mm) 比值能直观展现液压仿形机构在不同液压缸初始伸出量与作业速度下上仿形精度与下仿形精度差异性,仿形量平均误差 $\overline{\Delta h}$ (mm) 能直观展现液压仿形机构在不同液压缸初始伸出量与作业速度下的整体仿形稳定性,两者结合可以综合展现仿形机构调节精度。此外,平均调节时长 $\overline{\Delta t}$ (s) 能直观展现液压仿形机构在不同液压缸初始伸出量与作业速度下的整体仿形时效性,从而展现仿形机构调节速度。通过这 3 个指标可以从调节速度与精度两方面检验仿形机构的综合作业性能并探究滑动调节机构针对不同作业环境液压仿形机构作业性能的提升效果。每组试验重复 3 次,试验结果取平均值。

3.4 多因素试验

由上述玉米高速免耕播种机液压仿形机构设计、计算与分析可知,仿形机构上仿形量、下仿形量、总仿形量等均与调节机构控制的液压初始伸出量有

关。此外,不同作业速度下,播种单体作业时,起伏曲线的波动频率与波动峰值均不同,仿形机构作业效果会产生变化。因此,为探明作业速度与液压缸初始伸出量对免耕播种机液压仿形机构性能的影响,以作业速度、液压缸初始伸出量为试验因素进行二因素五水平正交旋转组合试验。因素编码如表4所示,正交试验方案与结果如表5所示, x_1 、 x_2 为因素编码值。

表 4 试验因素编码
Tab.4 Test factors and codes

编码	因素	
	液压缸初始伸出量/mm	作业速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
1.414	70.0	16.0
1	64.1	14.8
0	50.0	12.0
-1	35.9	9.2
-1.414	30.0	8.0

通过数据处理软件 Design-Expert 12.0 对试验结果进行因素方差分析,筛选出影响较为显著的因素,进而得到性能指标与因素编码值回归方程

$$y_1 = 1.19 - 0.1686x_1 + 0.0734x_2 - 0.0175x_1x_2 - 0.0947x_1^2 - 0.0872x_2^2 \tag{14}$$

$$y_2 = 1.11 + 0.0413x_1 + 0.7167x_2 + 0.0850x_1x_2 + 0.2276x_1^2 + 0.2151x_2^2 \tag{15}$$

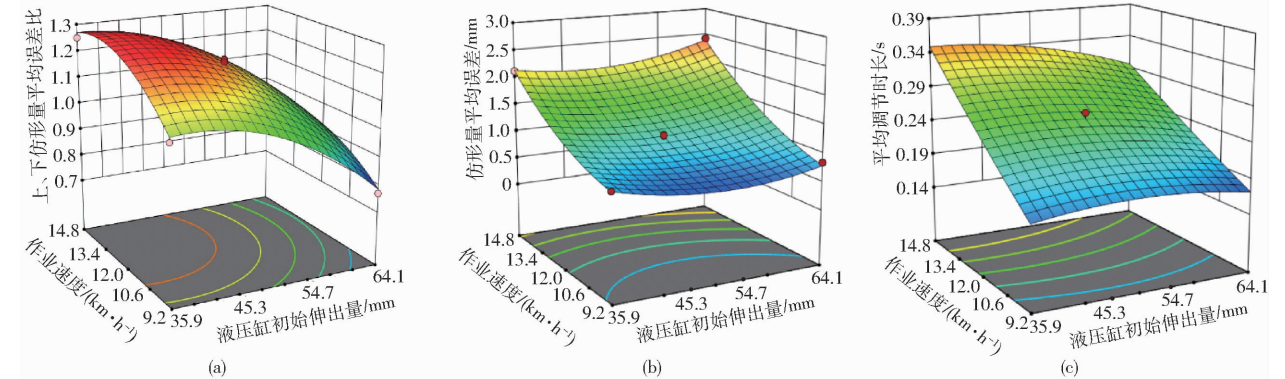


图 12 因素交互作用对试验性能影响的响应曲面

Fig.12 Response surfaces for effect of factor interactions on test performance

由图 12a 可知,上、下仿形量平均误差比随液压缸初始伸出量增加呈减小的趋势,随着作业速度的提升呈先增大后减小趋势;由图 12b 可知,仿形量平均误差随液压缸初始伸出量提升呈先降低后升高趋势,随作业速度提高呈上升趋势;由图 12c 可知,调节时长随液压缸初始伸出量提升呈下降趋势,随作业速度提高呈上升趋势。分析其变化原因为:初始伸出量增加过程中,会使得液压仿形机构总仿形量略微增加,从而缩短其调节时长,同时,上仿形量不断增加、下仿形量不断减小从而提高其上仿形调节

表 5 试验方案与结果 Tab.5 Test scheme and results					
序号	因素		上、下仿形量 平均误差	仿形量平均 误差 y_2 / mm	平均调节 时长 y_3 / s
	x_1	x_2	比 y_1		
1	-1	-1	1.07	0.88	0.19
2	1	-1	0.77	0.84	0.18
3	-1	1	1.25	2.12	0.34
4	1	1	0.88	2.42	0.28
5	-1.414	0	1.26	1.52	0.25
6	1.414	0	0.78	1.57	0.22
7	0	-1.414	0.93	0.49	0.17
8	0	1.414	1.14	2.55	0.37
9	0	0	1.18	1.09	0.26
10	0	0	1.21	1.14	0.27
11	0	0	1.19	1.07	0.25
12	0	0	1.18	1.11	0.26
13	0	0	1.20	1.12	0.27

$$y_3 = 0.262 - 0.0141x_1 + 0.0666x_2 - 0.0125x_1x_2 - 0.0147x_1^2 + 0.0027x_2^2 \tag{16}$$

为直观地分析试验指标与因素间关系,运用 Design-Expert 12.0 软件得到响应曲面。因交互作用项对上下仿形平均误差比、仿形平均误差、平均调节时长影响均显著,故分析液压缸初始伸出量与作业速度的交互作用对试验性能指标的影响,响应曲面如图 12 所示。

精度、降低下仿形精度,使得液压仿形机构上、下仿形量平均误差比不断减小。在此过程中,仿形量平均误差先随上仿形误差的减少而降低,在中间水平时达到最低后,随下仿形量误差的增加而提升。此外,当作业速度提升时,试验台起伏频率以及起伏落差增加,使得液压仿形机构调节频率增加,调节峰值容易滞后,从而增加其调节时长,并增加仿形平均误差。其中,上仿形调节前期受影响较大,因此上下仿形平均误差比也呈现先递增后减小的趋势。

由此可见,针对不同作业速度下播种单体作业

环境,通过调节滑动调节机构,可以平衡播种单体上仿形误差与下仿形误差,优化上下仿形量误差比,以达到减少机构整体仿形误差以及缩短调节时长的效果。从图 12b 可以看出,当作业速度为 12.3 km/h 时,滑动调节机构针对仿形误差的优化效果最为显著,最大可使调节误差降低 18.99%;从图 12c 可以看出,当作业速度为 14.8 km/h 时,滑动调节机构针对调节时长的优化效果最为显著,最快可使调节速度提升 16.11%。同时,配合滑动调节机构,可使不同作业速度下仿形量平均误差小于等于 2.02 mm,平均调节时长小于等于 0.29 s,因此,该机构仿形性能台架试验合格。

3.5 田间对比试验

为了检验起伏监控系统的实际调节效果,同时进一步验证高速免耕播种机液压仿形机构的田间仿形性能,将其与安装弹簧仿形与自重仿形的播种单体进行田间试验对比。试验场地同样选择黑龙江八一农垦大学试验示范田。选用麦赛福格森 1204 型拖

拉机,播深预设值 50 mm,调节液压缸初始伸出量至 53 mm,区间长度为 100 m,每隔 2 m 采集一次,利用天目 XG-150 型高精度数显式测深尺测量播种深度,试验中首尾 5 个点的播种深度作为拖拉机的加速段与减速段,不作为试验采集点。试验如图 13 所示。



图 13 田间试验

Fig. 13 Field test

试验指标为平均播深、播深合格率与播深变异系数。根据《免耕播种机质量评价技术规范》中规定,若播深误差 $\Delta H \leq 10.0$ mm,即为合格。

设定播种前进速度为 8、10、12、14、16 km/h,分别进行 3 次重复试验,取平均值,试验结果如表 6 所示。

表 6 田间对比试验结果
Tab. 6 Results of field comparative test

播种速度/ (km·h ⁻¹)	自重调节			弹簧调节			液压调节		
	平均播深/ mm	播深合格 率/%	播深变异 系数/%	平均播深/ mm	播深合格 率/%	播深变异 系数/%	平均播深/ mm	播深合格 率/%	播深变异 系数/%
8	51.8	90.2	16.0	48.8	96.2	10.1	49.1	97.9	4.97
10	51.0	88.8	16.8	47.1	95.8	12.0	48.6	98.1	5.08
12	45.3	84.5	17.9	46.0	92.2	13.4	50.5	96.3	5.64
14	45.9	80.2	19.0	47.0	89.3	15.2	48.2	95.4	6.08
16	45.5	77.1	21.2	46.6	85.8	16.6	47.9	94.8	6.12

试验结果表明,在作业速度 8、10、12、14、16 km/h 下,自重调节、弹簧调节、液压调节的调节性能均随着作业速度的提高而降低,高速免耕播种机液压仿形机构播深合格率在 16 km/h 达到最低,为 94.8%,满足行业标准中播种深度合格率大于等于 75% 的规定。相较于自重调节与弹簧调节,所设计的液压仿形机构合格率与变异系数得到明显提升,其中,播深合格率最大增加 17.70 个百分点,播深变异系数最大降低 15.08 个百分点。因此装有液压仿形机构的玉米高速免耕播种机田间作业播深一致性控制效果优于通过自重调节以及弹簧调节的玉米高速免耕播种机,该机构田间对比试验合格。

4 结论

(1)设计了一种玉米高速免耕播种机无级调节主动仿形装置,作业环境适应性强,配合补偿调节的方式实现高速作业下的高精度同步仿形。进行了播种单体受力分析,确定液压系统参数,得出不同液压缸初始伸出量下的仿形参数,并通过静力学分析确

定液压缸初始伸出量与机构最大应力、应变之间的关系,得出最大应力为 130.29 MPa、最大变形量为 0.173 12 mm。

(2)二因素五水平正交旋转组合试验确定了液压缸初始伸出量与作业速度对液压仿形机构性能的影响,验证了所设计滑动调节机构对其作业适应性的提升效果。结果表明,当作业速度为 12.3 km/h 时,滑动调节机构针对仿形量误差优化效果最为显著,最大可使调节误差降低 18.99%,当作业速度为 14.8 km/h 时,滑动调节机构针对调节时长优化效果最为显著,可使调节速度提高 16.11%,不同作业速度下仿形量平均误差小于等于 2.02 mm,平均调节时长小于等于 0.29 s。

(3)田间对比试验结果表明,装备该液压仿形机构的播种单体,播深合格率达到 94.8%,播深最大变异系数为 6.12%,各项指标均满足玉米播种农艺要求,且明显优于弹簧仿形和自重仿形,播深合格率最大增加 17.7 个百分点,播深变异系数最大降低 15.08 个百分点。

参考文献

- [1] HELIOS W, JAMA-RODZEŃSKA A, SERAFIN-ANDRZEJEWSKA M, et al. Depth and sowing rate as factors affecting the development, plant density, height and yielding for two faba bean (*Vicia faba* L. var. minor) cultivars[J]. Agriculture, 2021, 11(9): 820.
- [2] 刘斌祥, 程秋博, 周芳, 等. 种子大小与播种深度对玉米出苗、苗期光合特性与保护酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(2): 98–106.
- LIU Binxiang, CHENG Qiubo, ZHOU Fang, et al. Effects of seed size and seeding depth on photosynthetic characteristics and protective enzyme activities of maize at seedling emergence and seedling stage[J]. North China Journal of Agriculture, 2020, 35(2): 98–106. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 赵凌天, 咸云宇, 刘光明, 等. 不同机械化耕播模式对冬小麦幼苗质量和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 31–38.
- ZHAO Lingtian, XIAN Yunyu, LIU Guangming, et al. Effects of different mechanized tillage and sowing modes on the seedling quality and yield of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 31–38. (in Chinese)
- [5] BAZZAZ M M, HOSSAIN A, TIMSINA J, et al. Growth, yield attributes and yield of irrigated spring wheat as influenced by sowing depth[J]. Open Agriculture, 2018, 3(1): 72–83.
- [6] WALNE C H, REDDY K R. Temperature effects on the shoot and root growth, development, and biomass accumulation of corn (*Zea mays* L.)[J]. Agriculture, 2022, 12(4): 443.
- [7] 曹慧英, 史建国, 朱昆仑, 等. 播种深度对夏玉米冠层结构及光合特性的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(1): 102–109.
- CAO Huiying, SHI Jianguo, ZHU Kunlun, et al. Effects of sowing depth on canopy structure and photosynthetic characteristics of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(1): 102–109. (in Chinese)
- [8] 李月明, 王成. 不同播种深度对不同玉米品种种子活力的影响[J]. 种子, 2019, 38(2): 30–36.
- LI Yueming, WANG Cheng. Effects of different sowing depth on seed vigor of maize varieties[J]. Seed, 2019, 38(2): 30–36. (in Chinese)
- [9] 苑严伟, 白慧娟, 方宪法, 等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 1–18.
- YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1–18. (in Chinese)
- [10] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38–48.
- YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38–48. (in Chinese)
- [11] 齐智娟, 宋芳, 张忠学, 等. 保护性耕作对寒地黑土土壤水热效应与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 380–389.
- QI Zhijuan, SONG Fang, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of different conservation tillage methods on soil hydrothermal condition as well as maize yield in cold black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 380–389. (in Chinese)
- [12] 宫元娟, 金忠博, 白晓平, 等. 甘蔗收获机割台随动控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 119–128, 138.
- GONG Yuanjuan, JIN Zhongbo, BAI Xiaoping, et al. Design and experiment of servo control system for sugarcane header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 119–128, 138. (in Chinese)
- [13] NAN Yulong, ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, et al. Research on profiling tracking control optimization of orchard sprayer based on the phenotypic characteristics of tree crown[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106455.
- [14] 祝露, 尤泳, 王德成, 等. 悬挂式割草机折叠机构优化与液压仿形系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 122–130.
- ZHU Lu, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimal design and experiment of folding mechanism and hydraulic profiling system of hanging mower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 122–130. (in Chinese)
- [15] 金诚谦, 刘岗微, 倪有亮, 等. 基于 MBD–DEM 耦合的联合收获机割台仿形机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 1–10.
- JIN Chengqian, LIU Gangwei, NI Youliang, et al. Design and experiment of header profiling mechanism for combine harvester based on MBD–DEM coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(2): 1–10. (in Chinese)
- [16] SUOMI P, OKSANEN T. Automatic working depth control for seed drill using ISO 11783 remote control messages[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 116: 30–35.
- [17] 惠云婷, 张国锐, 马海明, 等. 自走式青饲料收获机仿形系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 1–9.
- HUI Yunting, ZHANG Guorui, MA Haiming, et al. Header profiling system of self-propelled green fodder harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 1–9. (in Chinese)

(in Chinese)

[27] 秦大同,谢里阳. 现代机械设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

[28] 祝英豪,夏俊芳,曾荣,等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报,2020,51(10):42 – 50.
ZHU Yinghao, XIA Junfang, ZENG Rong, et al. Prediction model of rotary tillage power consumption in paddy stubble field based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42 – 50. (in Chinese)

[29] 张青松,齐涛,敖倩,等. 油菜机械直播机开沟浅旋装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(10):58 – 67,104.
ZHANG Qingsong, QI Tao, AO Qian, et al. Design and experiment of rapeseed direct seeding machine with furrow opener and shallow plowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 58 – 67, 104. (in Chinese)

[30] 王磊,边祺旺,廖庆喜,等. 高茬黏重稻茬田油菜直播埋茬防堵深施肥复合装置研究[J]. 农业机械学报,2023,54(2): 83 – 94.
WANG Lei, BIAN Qiwan, LIAO Qingxi, et al. Burying stubble and anti-blocking deep fertilization composite device for rapeseed direct planting in high stubble and heavy soil rice stubble field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 83 – 94. (in Chinese)

[31] 李蒙良,廖庆喜,裴立民,等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(5):47 – 58,90.
LI Mengliang, LIAO Qingxi, PEI Limin, et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 47 – 58, 90. (in Chinese)

[32] 张青松,廖庆喜,肖文立,等. 油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J]. 中国油料作物学报,2018,40(5):702 – 711.
ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702 – 711. (in Chinese)

[33] 康艳,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜宽幅折叠式浅旋精量联合直播机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8):42 – 52,109.
KANG Yan, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Design and experiment of rapeseed wide-width folding shallow-rotation combined precision direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 42 – 52, 109. (in Chinese)

(上接第 120 页)

[18] YANG R, WANG Z, SHANG S, et al. The design and experimentation of EVPIVS – PID harvesters’ header height control system based on sensor ground profiling monitoring[J]. Agriculture, 2022, 12(2):282.

[19] BOSHOF B V D. Automatic depth control for seed planter based on soil conductance sensing[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1970.

[20] NIELSEN S K, NØRREMARK M, GREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127:690 – 698.

[21] ISMAIL Z, ISMAIL N, SALEM S. Simulation of down force for no-till seeder using ultrasonic and arduino elements[J]. Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, 2017, 8(10): 509 – 514.

[22] 付卫强,董建军,梅鹤波,等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(6):68 – 77.
FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 68 – 77. (in Chinese)

[23] ZHOU L, MA Y, ZHOU H, et al. Design and test of sowing depth measurement and control system for no-till corn seeder based on integrated electro-hydraulic drive[J]. Applied Sciences, 2023, 13(10): 5823.

[24] 衣淑娟,李怡凯,陈继国,等. 俯仰式播种单体仿形性能检测试验台设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):90 – 100.
YI Shujuan, LI Yikai, CHEN Jiguo, et al. Design and test of pitching seeding unit profiling performance testing bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 90 – 100. (in Chinese)

[25] 汤庆,吴俊,蒋兰,等. 油菜耕整移栽联合作业机液压仿形系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11):95 – 102.
TANG Qing, WU Jun, JIANG Lan, et al. Design and test of hydraulic profiling system for rape seedling combined transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 95 – 102. (in Chinese)

[26] 吕金庆,杨晓涵,冯雪,等. 马铃薯播种机播深调控装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(12):13 – 21.
LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, FENG Xue, et al. Design and experiment of sowing depth control device of potato planter[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12): 13 – 21. (in Chinese)