

折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机设计与试验

史增录^{1,2} 王美静¹ 张学军^{1,2} 张燕^{1,2} 李明华¹ 卢登明³

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;

3. 新疆金天成机械装备有限公司, 阿克苏 842008)

摘要: 为进一步提高铺膜精量播种机的作业效率, 解决道路通行不便、田间地头转向困难的问题, 改进设计了一种可平行折叠的宽幅铺膜精量播种机, 一次作业可完成种床整形、开沟铺膜铺带、播种、覆土等工序。阐述了播种机整机结构及工作原理, 对仿形机构、宽幅机架、举升装置和液压系统等关键部件进行设计分析, 确定了各部件的最佳尺寸及影响升降过程平稳性的关键因素; 通过 ADAMS 软件对整机展开与升降过程进行刚柔耦合分析, 得到展开过程中宽幅机架最大受力点位置以及滑轨梁的变形曲线。为验证折叠式棉花宽幅铺膜播种机的作业性能, 对其铺膜、铺带、播种性能进行田间试验, 试验结果表明, 采光面宽度合格率为 92.1%, 单粒率为 96.4%, 膜下播种深度合格率为 95.7%, 穴距合格率为 96.3%, 滴灌带纵向拉伸率为 0.73%, 满足行业标准及农艺要求。

关键词: 棉花; 铺膜播种机; 宽幅; 折叠

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0053-10

OSID:



Design and Test of Folding Cotton Wide Film Spreading Precision Seeder

SHI Zenglu^{1,2} WANG Meijing¹ ZHANG Xuejun^{1,2} ZHANG Yan^{1,2} LI Minghua¹ LU Dengming³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China

3. Xinjiang Jintiancheng Machinery Equipment Co., Ltd., Aksu 842008, China)

Abstract: In order to further improve the operational efficiency of film-laying precision seeding and solve the problems of inconvenient road access and difficult steering in the field, a parallel-folding wide-width film-laying precision seeding machine was improved and designed, which can complete the processes of seed bed shaping, furrowing and film-laying and belt laying, sowing and mulching in one operation. The structure and working principle of the seeding machine were described, and the key components such as profiling mechanism, wide frame, lifting device and hydraulic system were designed and analyzed, and the dimensions of each component and the key factors affecting the smoothness of the lifting process were determined; the rigid-flexible coupling analysis was carried out on the unfolding and lifting process of the whole machine through the ADAMS software to get the position of the maximum stress point of the wide frame and the deformation curve of the slide beam in the unfolding process. In order to verify the operational performance of the folded cotton wide film spreading planter, field tests were conducted on its film spreading, tape spreading and seeding performance, and the test results showed that the qualification rate of the width of the picking surface was 92.1%, the rate of single grain was 96.4%, the qualification rate of the depth of seeding under the film was 95.7%, the qualification rate of the distance between holes was 96.3% and the rate of the longitudinal stretching of the drip irrigation belt was 0.73%, which met the industry standards and agronomic requirements, and it can be used for the work of agricultural machinery in the work of a larger width. It can provide reference for the design and improvement of agricultural machinery with large working width and the need of parallel folding.

Key words: cotton; film spreading seeder; wide; folding

收稿日期: 2024-05-05 修回日期: 2024-05-30

基金项目: 新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(科技援疆计划)(2021E02055)和新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A176)

作者简介: 史增录(1986—), 男, 高级实验师, 博士, 主要从事农业机械装备研究, E-mail: shizld@qq.com

0 引言

棉花作为我国重要的战略物资和经济作物,在国民经济中具有举足轻重的作用。新疆是我国最大的棉花产区^[1-4],棉花已经成为新疆地区的重要经济产业和农民收入的主要来源^[5]。播种是棉花全程机械化的基础环节,通过农机农艺融合,促进棉花提质增效,增强棉花产业竞争优势的重要途径之一^[6]。农业种植规模化、集约化的发展及大功率拖拉机的应用,为宽幅、高效和联合作业播种机的发展创造了条件。

宽幅铺膜精量播种技术是提高播种作业效率、降低作业成本的关键,国内外学者针对不同农作物、不同农艺要求等进行了一系列研究。国外对大型宽幅折叠播种技术研究开展较早,根据折叠方式的不同,可分为对折式、前置折叠式以及水平折叠式。马斯奇奥 Pinta 系列气吹式条播机采用可对折式的设计方案,左右两侧副机架在液压油缸的推动下两侧向内折叠;约翰迪尔 1775t 集约型播种机和爱科 9810 系列播种机采用前置折叠的方式,通过液压机构使两侧机架沿机具前进方向折叠,具有较大播种幅宽的同时对于转弯半径的需求也相对较大;德国阿玛松 ED 播种机通过折叠机构将两侧机架进行抬升实现水平折叠。以上国外宽幅折叠式播种机主要适用于大型农场的免耕、气力式排种器精量播种。国内地势较为复杂,专家学者针对不同地理环境对宽幅播种机进行了大量研究。康艳等^[7]设计的油菜宽幅折叠式浅旋精量联合播种机,采用侧翻折叠的形式设计了折叠机构,一次作业可实现开畦沟、浅旋灭茬、精量播种、种床覆土等功能,解决了油菜播种工序复杂、效率低等问题;宋德平等^[8]针对棉花宽行种植模式设计了一款可对折式棉花覆膜播种机,可完成棉花 3 膜 6 行播种作业,实现宽幅作业;王东伟等^[9]发明了一种可折叠式 4 垄 8 行大型花生播种机,通过液压机构将两侧边播种机架进行抬升,解决道路运输困难的问题。部分学者针对宽幅农机具运输和田间转移困难等问题,对农用机架进行设计与优化^[10]。

由于国外宽幅折叠播种机主要以免耕播种机为主,其纵向长度较小,其折叠机构不适宜直接用于棉花铺膜铺滴灌带的播种机。国内宽幅播种机主要适用于油菜、小麦、玉米等作物种子进行免耕播种^[11-12],多采用侧翻对折式折叠机构。棉花铺膜播种机一次作业要完成碎土镇压、开沟、铺膜、铺滴灌带、穴播、覆土等工序,为防止穴播器种箱的种子掉落,克服铺膜播种机纵向长度大造成重心后移后翻

力矩大的难题,研究可平行折叠棉花宽幅铺膜精量播种机具有重要意义。

为进一步提高棉花播种效率,解决宽幅播种机运输不便、田间地头转向困难及地块宽度不足时机具适应性差等问题,结合棉花铺膜种植的农艺要求,设计一款三段式平行折叠的铺膜精量播种机,对仿形机构、宽幅机架、举升装置和液压系统等关键部件进行设计与分析,开展伸缩、举升机构运动规律分析,对关键部件的受力及运动进行分析,利用 ADAMS 刚柔耦合方法开展关键部件的受力分析,以克服播种机纵向长度过大造成重心后移、后翻力矩大的难题,提高折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机的稳定性和可靠性。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机主要由左侧副机架、滑轨梁、主梁、伸缩油缸、举升油缸、右侧副机架、举升装置、铺膜播种组件等部件组成,整机结构如图 1 所示。整机采用三段水平式折叠机构,每段折叠机构配备 1 组常规 1 膜 6 行铺膜播种组件,铺膜播种组件主要由滴灌带架、铺膜装置、精量播种装置以及覆土装置构成。左、右副机架与铺膜播种组件连接,并通过滑轨梁连接在主梁上。通过控制伸缩油缸的伸缩实现左右两边铺膜播种组件的展开和收缩;中间铺膜播种组件通过举升装置与机架连接,通过举升油缸实现上升-下降功能。

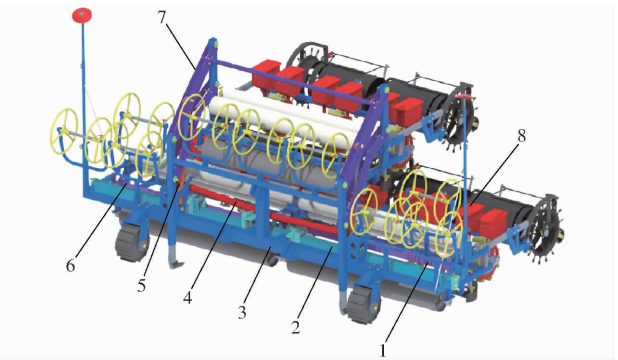


图 1 折叠式宽幅铺膜精量播种机结构图

Fig.1 Structure diagram of folding wide film spreading precision seeder

1. 左侧副机架 2. 滑轨梁 3. 主梁 4. 伸缩油缸 5. 举升油缸
6. 右侧副机架 7. 举升装置 8. 铺膜播种组件

1.2 工作原理

折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机采用三点悬挂装置与拖拉机挂接。作业前,通过操控拖拉机驾驶室内液压阀将两侧边铺膜播种组件展开,中间铺膜播种组件下降至与两侧边平齐,使整机由运输状态

转变为工作状态,如图 2a 所示。播种作业时,随着拖拉机前进,铺膜播种组件依次完成种床整形、开沟铺膜铺带、精量播种、覆土等多项工序。播种作业完成后,通过操纵液压阀使中间铺膜播种组件抬升,随后将两侧边铺膜播种组件向中间对称收缩,整机由工作状态转变为运输状态,如图 2b 所示。整机主要技术参数如表 1 所示。

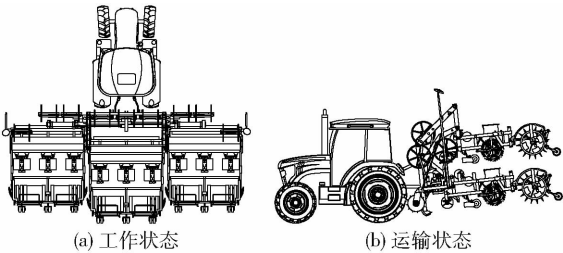


图 2 播种机状态示意图

Fig. 2 Schematics of state of planter

表 1 折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机主要技术参数

Tab. 1 Folding cotton wide film spreading precision planter main technical parameters

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 970×6 650×1 700
折叠状态尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 970×4 400×2 900
整机质量/kg	2 000
配套动力/kW	89.5
前进速度/(km·h ⁻¹)	0~3.5
播种行数	18
播种深度/cm	3~5

2 关键部件设计与参数分析

2.1 棉花种植农艺要求

新疆作为我国重要的优质棉生产基地,为适应棉花机械化收获的作业要求,目前种植模式主要以 1 膜 6 行(660 mm + 100 mm)的宽窄行棉花机采棉模式为主^[13],地膜宽度为 2 050 mm,如图 3 所示。窄行之间铺设滴灌带,将覆膜栽培技术与滴管技术相结合,具有保温保墒、节水节肥、增产抑盐的优点,可有效缓解水资源不足与农业用水率不高的矛盾。

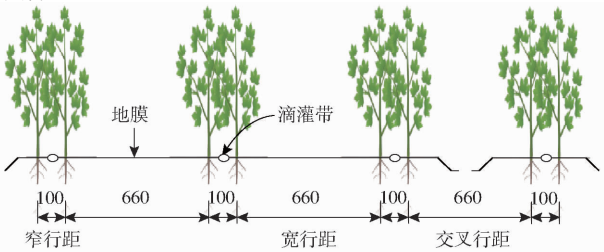


图 3 新疆棉花种植模式示意图

Fig. 3 Schematic of cotton planting pattern in Xinjiang

折叠式宽幅铺膜精量播种机工作状态为 3 膜 18 行,整机为对称结构,因此以单组铺膜播种组件为例确定播种机作业幅宽。作业幅宽需根据新疆地区棉花种植农艺模式即棉花播种行距和行数确定,选取 660 mm + 100 mm 机采棉的栽培方式,则单组铺膜播种组件作业幅宽 U 为

$$U = 3(V + W) \tag{1}$$

式中 U ——折叠式播种机作业幅宽,mm
 V ——机采棉模式窄行距,为 100 mm
 W ——机采棉模式宽行距,为 660 mm

将数据代入式(1),得铺膜播种组件作业幅宽为 2 280 mm,单组铺膜播种组件宽度等于该组件作业幅宽减去两侧地膜覆土宽度,两侧地膜覆土宽度为 150 mm,求得铺膜播种组件宽度为 2 130 mm,取整为 2 100 mm。

2.2 仿形机构设计

仿形机构是铺膜播种组件与宽幅机架的连接机构,通过仿形机构的调节,可保证铺膜播种组件在不平整的田间地面作业过程中始终保持种床整形、开沟、展膜、播种、覆土等性能的一致性^[14],仿形性能直接影响播种机的作业质量。影响仿形能力的主要因素有拉杆长度 L_g 、牵引角 ξ 、仿形量 H ,仿形机构原理如图 4 所示。

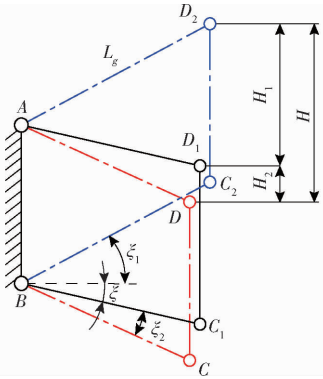


图 4 平行四杆仿形机构

Fig. 4 Parallel four-bar copying mechanism

作业地形以及播前耕整情况等会影响播种机仿形机构仿形量,因此拉杆长度需要按照实际播种农艺要求及仿形量来决定,由图 4 可知仿形机构总仿形量 H 为

$$H = H_1 + H_2 = L_g(\sin(\xi + \xi_2) + \sin\xi_1) \tag{2}$$

式中 H_1 ——上仿形量,mm
 H_2 ——下仿形量,mm
 ξ_1 ——上仿形角,(°)
 ξ_2 ——下仿形角,(°)

结合图 4 与式(2)可知,当播种机总仿形量确定时,拉杆越短,拉杆牵引角、上下仿形角变化范围

越大;拉杆越长,拉杆牵引角、上下仿形角变化范围越小^[15-16]。随着拉杆长度增加,牵引角变化范围越小,此时播种机稳定性增强,有利于开沟及播种作业。但在实际播种作业过程中拉杆过长,折叠式播种机铺膜播种组件的纵向稳定性变差,播种质量难以保证。对于棉花播种机,一般情况下上下仿形量皆在 80 ~ 120 mm 之间,拉杆牵引角取 0° ~ 10°,上仿形角取 6° ~ 22°,下仿形角取 10° ~ 20°。此外本棉花播种机是在耕整后土地上作业,土地较为松软,因此拉杆牵引角 ξ 取 5°。

综合考虑稳定性与各组铺膜播种组件对仿形要求较高,上、下仿形量可取 70 ~ 110 mm,暂设下仿形量 H_2 为 100 mm,上下仿形角 ξ_1 、 ξ_2 暂设为 10°、15°,将数据代入公式

$$L_g = \frac{H_2}{\sin(\xi + \xi_2) - \sin\xi}$$

(3)

计算可得拉杆长度为 392.37 mm,取整为 400 mm,再将取整后数据代入公式

$$H_1 = L_g \sin\xi_1 + L_g \sin\xi$$

(4)

计算上仿形量 H_1 为 102.33 mm,在 70 ~ 110 mm 之间,设计满足使用要求。

2.3 宽幅机架设计

2.3.1 宽幅机架结构设计

宽幅机架是折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机的重要组成部分,其通过副机架与所有工作部件相连,是拖拉机与工作部件连接的桥梁。宽幅机架主要由牵引架、左右副机架、滑轨梁、伸缩油缸、滚轮组等部件组成,结构示意图如图 5 所示。

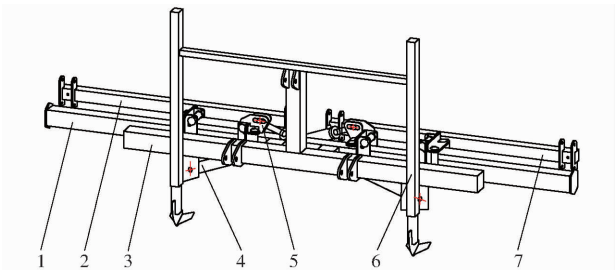


图 5 宽幅机架结构示意图

Fig. 5 Schematic of wide rack structure

1. 滑轨梁 2. 右侧副机架 3. 主梁 4. 伸缩油缸 5. 滚轮组
6. 牵引立柱 7. 左侧副机架

宽幅铺膜播种机折叠时将中间铺膜播种组件抬升,两侧铺膜播种组件沿宽幅机架的滑轨梁对称向中间收缩,主梁与中间铺膜播种组件通过牵引立柱连接。折叠后整机的宽度等于两侧铺膜播种组件的宽度,在前面计算得到单个铺膜播种组件宽度为 2 100 mm,前期田间调研过程中交接行宽度为 600 mm,设计的滑轨梁长度为 4 400 mm,主梁长度

为 3 000 mm。

2.3.2 伸缩油缸设计

伸缩油缸行程由左右两侧铺膜播种组件中心距离决定,根据设计要求伸缩油缸带动铺膜播种组件沿滑轨梁单向运动,有效行程较大,故采用单向作用单活塞杆液压缸。为保证机具在伸缩过程中两侧组件同步平稳拉伸,消除因液压缸差动速度差异造成两侧运动状态不对称从而影响播种性能,液压缸伸缩极限位置与整机展开与折叠状态需分别对应。以左侧伸缩油缸为例,分析展开状态极限位置,确定液压缸行程如图 6 所示。伸缩油缸座位孔 (O) 与主梁铰接,活塞杆安装孔 (E) 与滚轮组铰接,以水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴,两安装孔中心距离为 e ,竖直距离为 h ,伸缩油缸固定端与伸出端距离为 l ,主梁与滑轨梁距离为 a 。

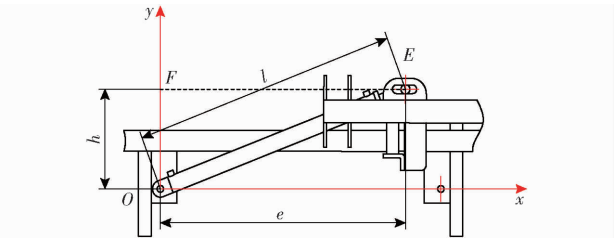


图 6 伸缩油缸安装位置示意图

Fig. 6 Schematic of installation position of telescopic cylinder

根据液压缸设计准则,在两极限位置液压缸两安装孔中心距离分别为 $l_0 = s + 300$ 、 $l_1 = 2s + 300$ (s 为油缸行程),根据安装位置几何关系构建方程

$$\begin{cases} h^2 + (a^2 + e_0^2) = l_0^2 \\ h^2 + (a^2 + e_1^2) = l_1^2 \end{cases}$$

(5)

根据《现代机械设计手册》中液压缸标准缸型行程尺寸,结合整机结构布局,对计算结果进行分析优化取整,确定伸缩油缸行程 s 为 1 400 mm,伸缩油缸伸出距离为 3 100 mm, h 为 400 mm。

根据播种机整机设计要求,单个伸缩油缸需要克服的最大工作负荷包括单个铺膜播种组件重力和滚动摩擦阻力,约为 6 600 N。当机架折叠,液压油缸进油,此时液压缸有效工作面积为

$$S_y = \frac{F_z}{P_z} = \frac{\pi(d_1^2 - d_2^2)}{4}$$

(6)

- 式中 F_z ——负载,N
- P_z ——液压工作压力,Pa
- d_1 ——液压油缸内径,mm
- d_2 ——活塞杆直径,mm

选择液压系统工作压力为 1.8 MPa。当工作压力小于 5 MPa 时,活塞杆直径选择 $(0.50 \sim 0.55) d_1$,选取 $d_2 = 0.5 d_1$,将选定的液压工作压力 P_z 、负载

F_z 代入式(6),得到 d_1 为 81.27 mm,根据文献[17],选取缸径 d_1 为 90 mm,杆径 d_2 取 40 mm。

2.4 举升装置设计

2.4.1 举升装置长度参数设计

举升装置作为整机实现中间铺膜播种组件抬升的关键部件,在确保能够托起中间铺膜播种组件的同时,也应尽量占用较小的空间,并且工作状态时中间组件与两侧组件需要在同一水平线上。举升装置为平面连杆机构,由举升油缸驱动。当举升装置较大时,抬升过程中由于中间铺膜播种组件较重连杆容易发生变形;当举升装置较小时,收缩过程中中间播种组件将与两侧组件发生干涉,前期试验得到举升装置适宜长度范围为 1 000 ~ 1 400 mm。当在田间转换方向时,覆土滚筒中留有土壤以及种箱中的种子,随着举升装置长度的增加弯矩也逐步增大,导致连杆发生变形影响播种效果,所以设计举升装置连杆长度为 1 200 mm。

2.4.2 举升装置运动分析

举升装置决定了播种机中间铺膜播种组件抬升的平稳性,对播种机的安全性与播种质量有重要意义。为探究伸缩过程中各构件的运动规律,采用封闭矢量多边形分析法建立矢量方程^[18-19],以举升装置和举升油缸所在安装位置建立坐标系 xOy ,如图 7 所示。

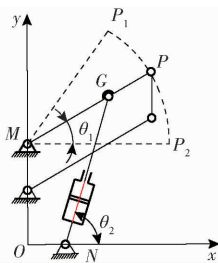


图 7 举升装置运动简图

Fig. 7 Lifting device movement sketch

图 7 中 l_{MP} 为举升装置上连杆长度, l_{OM} 为上连杆与主梁之间的距离,为避免机架抬升过程中各部件发生干涉同时降低机具重心, l_{OM} 取 400 mm, l_{ON} 为举升油缸安装位置与主梁中心的距离, l_{ON} 取 200 mm, l_{NG} 为举升油缸长度。点 G 与点 P 运动规律相同,以点 O 为原点建立 xOy 直角坐标系,构建封闭矢量多边形 $OMGN$,建立矢量方程

$$l_{OM} + l_{MG} = l_{ON} + l_{NG} \quad (7)$$

式(7)复数形式为

$$l_{OM} e^{i\pi/2} + l_{MG} e^{i\theta_1} = l_{ON} + l_{NG} e^{i\theta_2} \quad (8)$$

式中 θ_1 ——举升装置转动角度, ($^\circ$)

θ_2 ——举升油缸与 x 轴夹角, ($^\circ$)

将实部与虚部进行分离得

$$\begin{cases} l_{MG} \cos \theta_2 = l_{ON} + l_{NG} \cos \theta_2 \\ l_{OM} + l_{MG} \sin \theta_1 = l_{NG} \sin \theta_2 \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行求解可得举升油缸 l_{NG} 角位移表达式为

$$\theta_2 = \arccos \frac{l_{MG}^2 + l_{OM}^2 + 2l_{OM}l_{MG} \sin \theta_2 - l_{NG}^2}{2l_{ON}l_N} \quad (10)$$

将式(10)对时间 t 求导,通过实部与虚部相等,求得举升油缸 l_{NG} 角速度为

$$\omega_1 = \frac{\omega l_{MG} \cos \theta_1}{l_{NG} \sin(\theta_2 - \theta_1)} \quad (11)$$

式中 ω ——举升装置连杆角速度, rad/s

由计算结果可知,抬升过程中当举升油缸角速度一定时,随着油缸伸出长度的增加,举升装置的角速度会逐渐减小,下降过程中随着油缸伸出距离减小,举升装置角速度有增大趋势。

为分析折叠式宽幅铺膜播种机中间播种单体框架在举升过程中举升装置连杆受力变化情况,通过 Solidworks 软件定义播种机各部件材料并测算出单个铺膜播种组件质量为 588 kg。在举升过程中举升装置围绕点 M 做圆周运动,转动范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$,将举升装置结构进行简化,对其转动过程中弯矩进行分析,受力分析如图 8 所示。

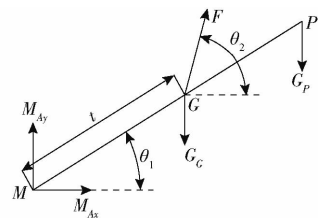


图 8 举升装置受力简图

Fig. 8 Lifting device force sketch

忽略举升装置自身重力对其进行受力分析,如图 8 所示,根据力矩平衡原理对旋转中心点 M 取矩,当举升装置转角为 θ_1 时可得

$$\sum M_M = G_G l_{MP} \cos \theta_1 - Ft \sin \theta_2 \cos \theta_1 \quad (12)$$

式中 F ——举升油缸对举升装置的支持力, N

G_G ——举升装置自身重力, N

t ——旋转中心 M 与举升油缸铰接点之间距离, mm

将式(12)化简可得

$$F = \frac{G_G l_{MP}}{t \sin \theta_2} \quad (13)$$

由式(13)可知,在中间铺膜播种组件抬升过程中,举升油缸受力与抬升角度有关,随着抬升角度的增大,受力逐渐减小,在刚开始抬升的一瞬间受力最大。

2.4.3 举升油缸参数设计

举升油缸与举升装置可视为气液动连杆机构,如图 9 所示,活塞杆为主动件,举升装置为从动件。

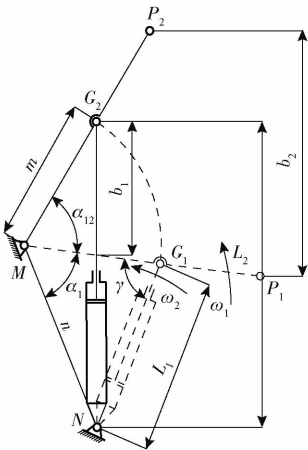


图 9 举升油缸-连杆机构运动简图

为避免折叠时中间播种组件与左右两侧组件发生干涉,根据前期经验,中间框架抬升高度 b_2 为 850 ~ 1 100 mm,为降低机具重心,先取 1 000 mm,举升油缸与举升装置铰接点抬升高度 b_1 取 500 mm,举升角 α_{12} 转动范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$,根据《现代机械设计手册》可知

$$\begin{cases} (L_1 + b_1)^2 = 1 + f^2 - 2f\cos(\alpha_1 + \alpha_{12}) \\ \cos\alpha_1 = \frac{1 + f^2 - L_1^2}{2f} \end{cases} \quad (14)$$

式中 L_1 ——初始位置时铰接点 G_1 到液压缸铰接点 N 的距离,mm
 f ——举升装置 MG 长度,mm
 α_1 ——举升装置初始位置角, ($^\circ$)

将式(14)消去 α_1 ,化简可得

$$if^4 - jf^2 + k = 0 \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} i = 2(1 - \cos\alpha_{12}) \\ j = 2[(2L_1^2 + 2L_1b_1 + b_1^2)(1 - \cos\alpha_{12}) + 2\cos\alpha_{12}(1 - \cos\alpha_{12})] \\ k = [(L_1 + b_1)^2 - (\cos\alpha_{12} - 1)](2 - 2L_1^2)\cos\alpha_{12} + (L_1 + b_1)^4 - 2(L_1 + b_1)^2 + L_1^4 - 2L_1^2 + 2 \end{cases} \quad (16)$$

由式(14)、(15)可解得 2 组解: $m = 638 \text{ mm}$,
 $\alpha_1 = 71.36^\circ$; $m = 1\,932 \text{ mm}$, $\alpha_1 = 10.20^\circ$ 。

根据传动角公式

$$\begin{cases} \cos\gamma = \frac{\sigma - \cos\alpha_1}{\sqrt{1 + \sigma^2 - 2\sigma\cos\alpha_1}} \\ \sigma = \frac{f}{n} \end{cases} \quad (17)$$

式中 γ ——传动角, ($^\circ$)
 σ ——举升油缸行程,mm
 n ——举升装置安装位置与举升油缸安装位置中心距离,mm

解得对应传动角分别为 71.12° 、 10.20° ,后一组数据传动角过小,不宜采用。所以可以得到举升油缸与举升装置铰接点 G 与点 M 距离为 638 mm,取整为 640 mm。

2.5 液压系统设计

为实现宽幅铺膜精量播种机由拖拉机液压系统控制折叠,设计液压系统原理图如图 10 所示。

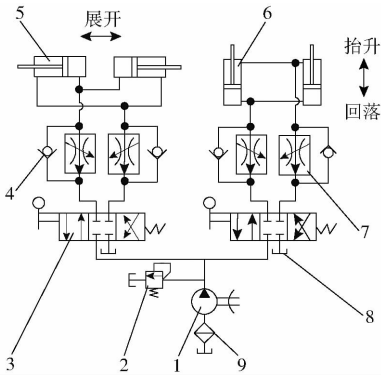


图 10 液压折叠系统原理图

Fig. 10 Hydraulic folding system schematic

1. 拖拉机油泵 2. 直动式溢流阀 3. 手动 O 型三位四通换向阀
4. 单向阀 5. 伸缩油缸 6. 举升油缸 7. 调速阀 8. 油箱
9. 过滤器

液压系统动力由拖拉机油泵提供,驾驶员操纵三位四通换向阀实现对两组油缸的控制。当整机从运输状态转变为工作状态时,首先将伸缩油缸电磁换向阀切换到左位,液压油通过左侧单向阀进入伸缩油缸无杆腔,有杆腔油液通过调速阀经过换向阀流回油箱,左右机架向两侧展开,其次将举升油缸换向阀切换到右位,液压油通过调速阀进入有杆腔,以及在中间播种框架重力作用下,无杆腔油液通过调速阀进入油箱,中间播种框架回落至地面;当整机完成播种作业后,举升油缸换向阀切换至左位,油液通过单向阀克服播种框架重力快速进入无杆腔,有杆腔油液通过单向阀流回油箱,举升油缸完成抬升动作,随后伸缩油缸将换向阀切换至右位,油液经单向阀进入有杆腔,无杆腔油液经调速阀进入油箱,两侧机架完成收缩,整机转变为运输状态。

该系统中包括伸缩油缸、举升油缸、手动三位四通换向阀、单向阀、调速阀等液压元件。其中两对液压缸作为执行元件可实现折叠功能。由于铺膜播种组件较重,所以选用单向调速阀,在举升过程中负载变化的情况下依旧保持速度的稳定性;直动式溢流阀在整个液压系统中可以起到调节主油路压力的作

用,当油路压力超过预设压力时可与油箱联通泄压,同时起到液压系统安全阀的作用^[20]。

3 刚柔耦合仿真试验

本文采取宽幅机架-滑轨梁刚柔耦合仿真,利用 ADAMS 软件进行分析,从 ANSYS 软件中导出柔性体到 ADAMS 中仿真,对柔性体变形和受力过程描述与真实情况拟合程度较高^[21]。

3.1 仿真模型建立

折叠式宽幅铺膜精量播种机能否平稳展开与收缩是实现机具折叠的关键因素。为分析整机展开与收缩过程中,宽幅机架所受负载情况,利用虚拟样机技术对折叠式宽幅铺膜精量播种机进行刚柔耦合的模拟分析,在三维软件中进行建模,将不影响仿真结果的结构进行简化^[22],将简化后模型另存为 Parasolid(.X_T)格式文件并导入到 ADAMS 软件中,生成 ADAMS 环境下的模型,仿真模型如图 11 所示。

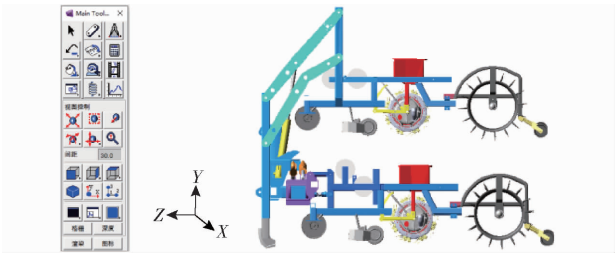


图 11 播种机整机仿真模型

Fig. 11 Simulation model of entire planter

通过对整机工作原理的分析,利用 ADAMS 软件中的工具箱进行操作,对整机模型各部件添加材料属性,所有模型材料设置为 steel,以模拟实际的模型属性。根据播种机实际折叠过程中各部件之间的相对运动关系,将宽幅机架中主梁与大地进行固定;举升装置与牵引立柱之间通过转动副连接;伸缩油缸与举升油缸在工作过程中,随着油缸的伸缩铰接点会相对转动,所以油缸两端铰接点采用转动副连接;左右副机架在滚轮组的带动下通过移动副在滑轨梁上实现伸缩。折叠式宽幅铺膜精量播种机模型不包括大地共有 10 个移动部件,添加 16 个旋转副、

2 个移动副、1 个固定副、4 个单向作用力,以准确模拟播种机在展开、折叠过程中的实际运动情况。

3.2 仿真前处理参数设定

为探究伸缩油缸在收缩时宽幅机架的受力变形情况,有必要将滑轨梁设置为柔性体。仿真试验前将滑轨梁三维模型图保存为 .X_T 格式导入有限元分析软件 ANSYS 中进行网格划分。滑轨梁材料为 Q235 钢,密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 、弹性模量为 210 GPa 、泊松比为 0.33 。为尽可能提高滑轨梁的计算精度和分析计算效率,将单元格尺寸设置为 5 mm ,网格划分完成后单元格 $6\,040$ 个,节点 $42\,480$ 个,并生成 mnf 格式的模态中性文件,将其导入到 ADAMS 中,通过 ADAMS 的 Flexible Bodies 选项在指定目录下打开已生成的 .mnf 文件,构建宽幅机架-滑轨梁刚柔耦合模型^[23-24]。

对虚拟样机进行仿真之前,可利用 ADAMS 自带的 Model Verify 工具对模型进行验证,对系统自由度、未定义质量构件、过约束等情况进行查询。设置仿真分析时间为 0.9 s 、步长为 200 步,进行仿真求解计算。

3.3 仿真结果分析

仿真结果如图 12a 所示,滑轨梁位置变化主要发生在 Y 轴和 Z 轴,X 轴方向没有变形。由于机具折叠过程中产生振动以及铺膜播种组件的重力作用,所以沿 Y 轴方向滑轨梁会产生较大幅度的变形,变形范围在 $0\sim30\text{ mm}$;在伸缩油缸展开-收缩的过程中,左、右机架在活塞杆拖动下产生 Z 轴方向的挠度变化,滑轨梁在 Z 轴方向会发生 $0\sim25\text{ mm}$ 的波动,而在 X 轴方向无位置变化。

在举升装置两端及中间位置分别选取标记点 5、标记点 1546 以及标记点 1581,如图 12b 所示,举升装置受力大小与连杆长度及转动角度有关,转动角度范围为 $0^\circ\sim60^\circ$ 。同一位置随着抬升角度变大,受力逐渐减小;同一时刻,标记点距离主机架越近,受力越大。所以举升装置与牵引立柱铰接点最大受力为 $1.3\times10^6\text{ N}$,举升装置中心位置最大受力为 $8\times10^5\text{ N}$,举升装置与中间铺膜播种单体连接位

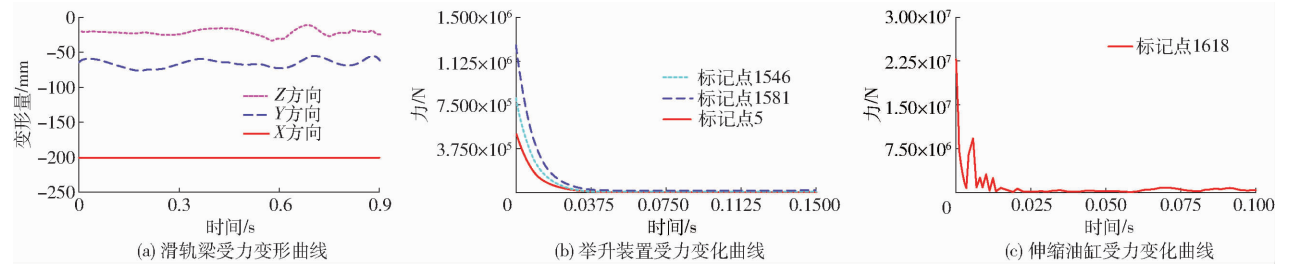


图 12 播种机关键部件受力变化曲线

Fig. 12 Variation curves of force on key components of planter

置受力为 4.2×10^5 N。

通过对整机展开过程进行分析,可以发现整个过程最大受力点出现在伸缩油缸与主梁位置安装处(标记点 1618),最大受力为 2.5×10^7 N,如图 12c 所示,从展平状态转换为收缩状态过程中,伸缩油缸受力不断减小。为减小整机展开时的阻力,油缸与主梁铰接点应低于与滚轮组的铰接点。

通过对滑轨梁进行应力分析,得到其折叠过程中最大受力为 1.25×10^6 N,如图 13 所示,滑轨梁采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的 Q235 方钢,最大许用应力为 235 MPa。根据

$$[\mu] = \frac{F_{\max}}{S}$$

(18)

式中 $[\mu]$ ——滑轨梁许用应力,MPa

$F_{\max}$ ——滑轨梁最大受力,N

S ——滑轨梁横截面积, m^2

计算得到滑轨梁许用应力为 125 MPa,设计满足要求。

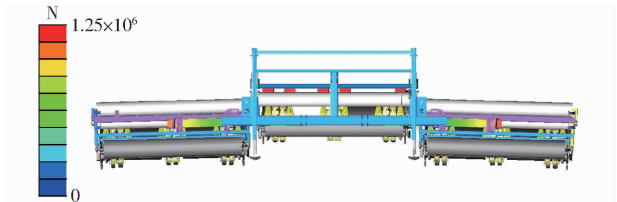


图 13 滑轨梁受力云图
Fig. 13 Slide beam force cloud diagram

4 田间性能试验

4.1 试验材料与设备

为检验折叠式宽幅铺膜精量播种机整机作业质量,2022 年 10 月在新疆生产建设兵团阿克苏地区一师六团开展田间铺膜播种试验,如图 14 所示。播种试验前测量得到土壤坚实度为 472 kPa,平均含水率为 9.6%,进行耕整地后土地上实下虚满足棉花穴播作业试验要求^[24];试验棉花品种选用新疆地区普遍种植的“新陆早 68 号”,其千粒质量为 97 g,含水率为 6.6%;膜卷规格为幅宽 2 050 mm,厚度 0.01 mm;整机作业时由雷沃欧豹 M1204 型拖拉机牵引工作,试验设备包括土壤坚实度测量仪、直尺、卷尺、挖种勺、记号笔等。

试验选用齿盘式棉花精量排种器,当拖拉机前进速度约为 2.0 km/h 时,单粒率为 94.3%,破损率为 0.09%,达到国家标准要求。试验前对整机进行试转和调试,使机器在正常状态下进行性能试验和生产试验,播种机行进速度为 2.0 km/h 时测定。

4.2 样机评价指标

由于目前我国没有折叠铺膜精量播种机相关国



图 14 播种机性能田间试验
Fig. 14 Field test of seeder performance

家标准,样机评价指标参考行业标准 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》、GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》、JB/T 7732—2006《铺膜播种机》和 NY/T 1559—2007《滴灌铺管铺膜精密播种机质量评价技术规范》要求。

折叠式宽幅铺膜播种机由于铺膜播种组件自身重量较大,且在实际运输过程中由于道路颠簸及重力作用,宽幅机架可能会发生少量变形,进而影响播种机播种均匀性(穴距、单粒率、空穴率)、播种深度、地膜展平度等。因此,对整机的铺膜铺带性能以及播种性能等相关评价指标进行田间试验,综合评价该播种机的作业效果。

4.3 试验结果与分析

折叠式棉花宽幅铺膜精量播种机检测性能要求和工作性能检测结果如表 2 所示。由试验结果可知,折叠式宽幅铺膜精量播种机试验指标均达到国家标准要求。

表 2 样机评价指标与检测结果

Tab. 2 Prototype evaluation indicators and test results			
	检测参数	标准值	检测值
铺膜性能	地膜纵向拉伸率/%	≥3	4.2
	采光面宽度合格率/%	≥80	92.1
	采光面展平度/%	≥95	96.7
	地膜破损程度/(mm·m ⁻²)	≤50	31.6
	膜边覆土厚度合格率/%	≥95	97.6
	膜边覆土宽度合格率/%	≥95	98.2
播种性能	破损率/%	≤1.0	0.2
	膜孔覆土厚度合格率/%	≥90	94.0
	膜下播种深度合格率/%	≥85	95.7
	孔穴错位率/%	≤1.0	0.26
	空穴率/%	≤4.0	2.5
	单粒率/%	≥85	96.4
铺带性能	穴距合格率/%	≥90	96.3
	滴灌带纵向拉伸率/%	≤1.0	0.73

折叠式宽幅铺膜精量播种机相较于 1 膜 12 行超宽膜棉花铺膜播种机^[25],作业效率提高 30%,单粒率提高 2.1 个百分点;相较于棉花免地膜精量播种机^[26],作业效率提高 2 倍,穴距合格率提高 5.46 个百分点,空穴率下降 0.04 个百分点。

田间试验验证了折叠式宽幅铺膜精量播种机在保证铺膜、铺带、播种联合作业农艺技术要求的情况下可以完成机架展开与折叠状态的转换,实现道路运输、地头换向等功能,在新疆地区具有较好的应用前景。

5 结论

(1)设计了一种折叠式宽幅铺膜精量播种机,阐述了其整机结构及工作原理,并对伸缩过程和抬升过程的主要工作部件进行设计分析;通过对其运动过程进行力学分析和动力学分析,得到各部件最佳参数以及影响折叠过程的相关因素。

(2)建立 ADAMS 虚拟样机仿真模型,为了得到滑轨梁伸缩过程的受力变形情况,对其柔性化并进行刚柔耦合分析,结果表明滑轨梁最大变形发生在梁的两端,最大变形量为 29 mm,举升装置与牵引立柱铰接点最大受力为 1.3×10^6 N,整机最大受力位置是伸缩油缸与主梁位置安装处,最大受力为 2.5×10^7 N,宽幅机架强度满足播种机作业要求。

(3)参照相关国家标准及行业要求对播种机铺膜铺带性能以及播种性能等评价指标进行试验,得到采光面宽度合格率为 92.1%、单粒率为 96.4%、膜下播种深度合格率为 95.7%、穴距合格率为 96.3%,满足行业标准要求。

参 考 文 献

- [1] 张佳喜,张彭,张虎,等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 76–84, 108. ZHANG Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76–84, 108. (in Chinese)
- [2] 沈从举,郭慧静,代亚猛,等. 新疆棉秆回收机械化现状及发展对策[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(5): 53–63. SHEN Congju, GUO Huijing, DAI Yameng, et al. Situation and strategies of mechanization in recycling of cotton stalk in Xinjiang[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(5): 53–63. (in Chinese)
- [3] 娄善伟,田立文,罗宏海,等. 新疆棉花优质高产关键生产技术分析[J]. 中国农业科学, 2023, 56(14): 2673–2685. LOU Shanwei, TIAN Liwen, LUO Honghai, et al. Analysis on key production techniques of cotton with good quality and high yield in Xinjiang[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(14): 2673–2685. (in Chinese)
- [4] 郭莹,张帅,王静怡,等. 全球棉花产业势力竞争的案例分析:内涵、范式与对策[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(11): 295–306. GUO Ying, ZHANG Shuai, WANG Jingyi, et al. Case analysis of global cotton industry power: connotation, paradigm and countermeasures[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(11): 295–306. (in Chinese)
- [5] 胡灿,王兴旺,王旭峰,等. 基于 Android 手机的田间棉花产量预测系统设计[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 252–259, 277. HU Can, WANG Xingwang, WANG Xufeng, et al. Field cotton yield prediction system based on Android mobile phone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 252–259, 277. (in Chinese)
- [6] 苑严伟,白圣贺,牛康,等. 棉花种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 1–11. YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress in the key technologies and equipment for cotton planting mechanization[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6): 1–11. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 宋德平,宋庆奎,成永朋,等. 基于机采棉的折叠式棉花覆膜播种机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(6): 27–31. SONG Deping, SONG Qingkui, CHENG Yongpeng, et al. Design and experiment of folded cotton membrane planter based on mechanical harvest cotton[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(6): 27–31. (in Chinese)
- [9] 王东伟,尚书旗,何晓宁,等. 可折叠式四垄八行大型花生播种机: CN105340401B[P]. 2017–11–21.
- [10] 刘宏新,唐师法,刘俊孝,等. 地轮中置式高机动性宽幅农具机架平台研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 105–114. LIU Hongxin, TANG Shifa, LIU Junxiao, et al. Middle-mounted wheel high-mobility universal frame platform for wide-breadth farm implements[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 105–114. (in Chinese)
- [11] 胡红,李洪文,李传友,等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 24–32. HU Hong, LI Hongwen, LI Chuanyou, et al. Design and experiment of broad width and precision minimal tillage wheat planter in rice stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 24–32. (in Chinese)
- [12] 李运通,万星宇,廖庆喜,等. 基于履带底盘的宽幅可折叠油菜割晒机设计与试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1–13[2024–03–24]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230122>. LI Yuntong, WANG Xingyu, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of wide folding rape windrower based on crawler type

power chassis[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition): 1 – 13[2024 – 03 – 24]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230122>. (in Chinese)

[13] 张恒恒, 王香茹, 胡莉婷, 等. 不同机采棉种植模式和种植密度对棉田土壤水热效应及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 39 – 47.
ZHANG Hengheng, WANG Xiangru, HU Liting, et al. Effects of different machine-harvested cotton planting patterns and planting densities on soil hydrothermal conditions and cotton yield[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(23): 39 – 47. (in Chinese)

[14] 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)

[15] 吕金庆, 崔鹏飞, 竹筱歆, 等. 大垄宽幅马铃薯中耕机纵横稳定性优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 88 – 96, 154.
LÜ Jinqing, CUI Pengfei, ZHU Xiaoxin, et al. Optimal design and test of longitudinal and lateral stability of large monopoly wide potato cultivator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 88 – 96, 154. (in Chinese)

[16] 刁培松, 赵殿赟, 姚文燕, 等. 玉米播种机滴灌带浅埋铺设装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 88 – 97.
DIAO Peisong, ZHAO Dianbao, YAO Wenyan, et al. Design and experiment of shallow buried laying device for drip irrigation belt of corn seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 88 – 97. (in Chinese)

[17] GB/T 2348—1993 液压气动系统及元件缸内径及活塞杆外径[S]. 1993.

[18] 吕金庆, 田忠恩, 吴金娥, 等. 4U1Z 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 39 – 47.
LÜ Jinqing, TIAN Zhongen, WU Jin'e, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 39 – 47. (in Chinese)

[19] 蒋林, 伞红军, 马帅. 移栽机栽植器的尺寸设计[J]. 机械设计, 2015, 32(7): 71 – 76.
JIANG Lin, SAN Hongjun, MA Shuai. Dimensions design of transplanting mechanism for transplanter[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(7): 71 – 76. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 金诚谦, 齐彦栋, 刘岗微, 等. 大豆联合收获机拨禾轮作用机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 104 – 113.
JIN Chengqian, QI Yandong, LIU Gangwei, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of soybean combine harvester reel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 104 – 113. (in Chinese)

[22] 韩明兴, 李森, 段宏兵, 等. 植物茎秆柔性夹持装置刚柔耦合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 109 – 118.
HAN Mingxing, LI Miao, DUAN Hongbing, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experiment of plant stem clamping device based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 109 – 118. (in Chinese)

[23] 杜小强, 韩鑫涛, 沈腾飞, 等. 基于 5R 并联机构的二自由度树冠振动装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 96 – 106, 131.
DU Xiaoqiang, HAN Xintao, SHEN Tengfei, et al. Design and experiment of two-degree-of-freedom canopy shaking equipment based on 5R parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 96 – 106, 131. (in Chinese)

[24] 李海同, 吴崇友, 沐森林, 等. 基于 ANSYS – ADAMS 的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 96 – 105.
LI Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS – ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 96 – 105. (in Chinese)

[25] 张学军, 陈勇, 史增录, 等. 双仓转盘式棉花竖直圆盘穴播种排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 27 – 36.
ZHANG Xuejun, CHEN Yong, SHI Zenglu, et al. Design and experiment of double-storage turntable cotton vertical disc hole seeding and metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 27 – 36. (in Chinese)

[26] 王旭, 刘江涛, 张晋国, 等. 棉花免地膜精量播种机的设计与试验[J]. 机械设计, 2023, 40(9): 22 – 28.
WANG Xu, LIU Jiangtao, ZHANG Jinguo, et al. Design and experiment of cotton mulching-free precision planter[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(9): 22 – 28. (in Chinese)