

玉米播种机滴灌带浅埋铺设装置设计与试验

刁培松¹ 赵殿报¹ 姚文燕¹ 逢焕晓¹ 王文君¹ 姜超²

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 山东亚沃农业机械有限公司, 烟台 261400)

摘要: 为解决在滴灌带浅埋铺设过程中,当机具紧急停车时滴灌带易产生松弛拥堵等现象,以及铺设装置对地形适应能力差等问题,设计了一种适用于玉米播种机且具备自动锁紧功能的滴灌带浅埋铺设装置。阐述了该滴灌带浅埋铺设装置的基本结构和工作原理,并对关键部件进行了理论分析与设计。对滴灌带卷盘转轴进行模态分析表明,该轴在正常作业时不会产生共振现象,并确定了滴灌带输送与自动锁紧装置、仿形装置和开沟铺设装置的关键结构和工作参数。依据玉米宽窄行种植模式要求,将滴灌带铺设装置集成在玉米播种机上并进行田间试验。结果表明:当机组作业速度为4~6 km/h时,滴灌带输送顺畅,铺设深度合格率为93.0%,铺设深度变异系数为22.3%,覆土量为619.5 g,能够满足滴灌带浅埋铺设的要求,当机组紧急停车时,滴灌带铺设自动锁紧装置及时锁紧,有效防止了滴灌带的松弛、拥堵现象。

关键词: 玉米播种机; 滴灌带; 浅埋铺设; 自动锁紧

中图分类号: S223.2⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)02-0088-10 OSID: 

Design and Experiment of Shallow Buried Laying Device for Drip Irrigation Belt of Corn Seeder

DIAO Peisong¹ ZHAO Dianbao¹ YAO Wenyan¹ PANG Huanxiao¹ WANG Wenjun¹ JIANG Chao²
(1. School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China
2. Shandong Yawo Agricultural Machinery Co., Ltd., Yantai 261400, China)

Abstract: In the process of laying drip irrigation belt, it is prone to appear relaxation and congestion of the belt when the seeder stops in an emergency, and the laying device has poor adaptability to field surface. In order to solve the problems, a shallow buried laying device for drip irrigation belt with automatic locking function was designed, which was suitable for corn seeder. The device can lock the drip irrigation belt coil in time when the seeder was shut down in an emergency, and prevent the phenomenon of drip irrigation belt winding and accumulation effectively. And it can realize shallow buried laying by copying and ensure the depth consistency of drip irrigation belt. The shaft did not appear resonance phenomenon under the normal operation condition through the modal analysis of the reel shaft of drip irrigation belt. The theoretical analysis and calculation of hydraulic brake device was carried out, and the key factors affecting the overflow amount of drip irrigation belt were determined. The working parameters of the parallel four-bar mechanism and the spring were designed, and the terrain adaptability can be improved through the joint operation with the copying wheel. The designed leveling shovel can compress and reshape the shape of the ditch bottom opened by the double disc ditch opener, providing a superior ditch bottom environment for shallow buried drip irrigation. Field experiments showed that when the forward speed of seeder was 4~6 km/h, the qualified rate of the depth laid by the shallow-buried laying device was 93.0%, the variation coefficient of laying depth was 22.3%, and the amount of covering soil was 619.5 g. In the process of operation, drip irrigation belt transportation was smooth. When the tractor stopped in an emergency, the automatic locking device of drip irrigation belt transportation can be braked in time to eliminate the accumulation and winding phenomenon of drip irrigation belt.

Key words: corn seeder; drip irrigation belt; shallow buried laying; automatic locking

收稿日期: 2021-09-03 修回日期: 2021-10-10
基金项目: 山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF007)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700703-03)和山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ005)
作者简介: 刁培松(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: dps2003@163.com

0 引言

地下滴灌是一种高效节水的新型灌溉技术,即通过铺设在耕层中的滴灌管网系统将水和液体肥料小流量、长时间、高频率直接灌入作物根区,供作物生长发育利用,达到节水、节肥、增产等目的^[1]。滴灌区玉米种植采用宽行与窄行相间排列的方式,通风、透光性较好^[2]。研制与玉米播种机配套使用的滴灌带铺设装置,在播种的同时进行滴灌带的铺设,可以简化滴灌带铺设工序,降低劳动强度,解决专业机具缺乏的问题^[3]。

国外对滴灌带铺设装置研究起步较早。以色列公司 Netafim 生产的渗灌管铺埋装置,最大铺埋深度可以达到 50 cm。ZHU 等^[4]设计制造了一种集滴灌带铺设和回收于一体的机具。近年来全国各地尤其是干旱和半干旱地区广泛进行了滴灌技术和滴灌装置、滴灌带铺设装置的研究^[5-9]。如田佰亮等^[10]设计了一种与高垄平台耕作方式相配套的滴灌带铺设机,李强^[11]设计了一种与玉米移栽机配套使用的滴灌带铺设装置,陈伟^[12]设计了一种马铃薯播种铺管机等。目前在滴灌带铺设过程中,存在机组前进中突然停车造成滴灌带的松弛和缠绕以及滴灌带埋设深度不稳定等问题,使得铺设过程不可靠。针对上述问题,拟设计一种适用于玉米播种机的滴灌带浅埋铺设装置,集成安装在玉米播种机上,并通过田间试验验证装置的作业性能。

1 整体结构与工作原理

1.1 滴灌带铺设玉米种植模式

滴灌区玉米采用宽窄行种植模式,将滴灌带浅埋在窄行中间地表以下 50 mm 处,实现类似渗透的功能,利用水肥一体化管理,可以实现节本增效^[13-14]。

该种植模式以 2 行玉米为一个种植带,如图 1 所示,窄行行距 $L_1=400\text{ mm}$,宽行行距 $L_2=600\text{ mm}$,滴灌带铺设在窄行中央距地面 $H=50\text{ mm}$ 深处。这种模式可以有效发挥玉米品种增产潜力,达到水肥的高效利用。在播种玉米的同时进行滴灌带的铺设,可以提高铺设效率,提升玉米种植作业的机械化程度。

1.2 总体设计

滴灌带浅埋铺设玉米播种机总体结构如图 2 所示,主要由滴灌带浅埋铺设装置、开沟施肥装置、开沟播种装置、机架、气吸式播种单体和智能监测系统等组成。整机主要技术参数如表 1 所示。

滴灌带浅埋铺设玉米播种机的动力由四轮拖拉

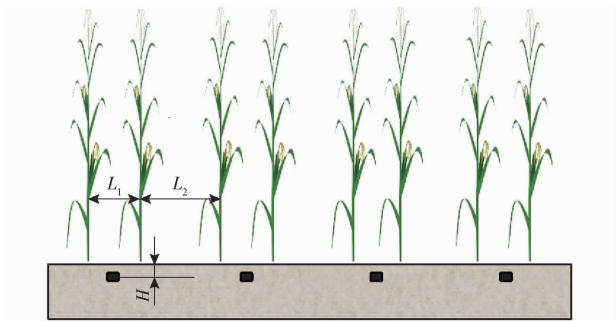


图 1 滴灌带铺设宽窄行玉米种植模式图
Fig. 1 Planting pattern diagram of drip irrigation belt laying wide and narrow rows of corn

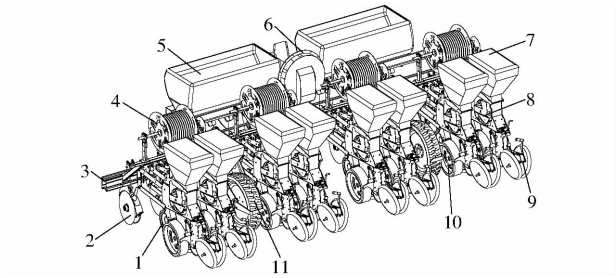


图 2 滴灌带浅埋铺设玉米播种机总体结构图
Fig. 2 Overall structure diagram of corn seeder with shallow buried drip irrigation belt

1. 滴灌带仿形浅埋铺设装置 2. 施肥开沟器 3. 悬挂横梁
4. 滴灌带输送装置 5. 肥箱 6. 风机 7. 种箱 8. 气吸式排种器 9. 覆土镇压轮 10. 播种开沟器 11. 地轮

表 1 滴灌带浅埋铺设玉米播种机主要技术参数
Tab. 1 Main technical parameters of corn seeder with shallow burial laying of drip irrigation belt

参数	数值/型式
配套动力/kW	89 ~ 103
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 000 × 1 800 × 1 720
整机质量/kg	1 800
排种器型式	气吸式
播种行数	8
播种行距/mm	400 ~ 800(可调)
播种粒距/mm	100 ~ 300(可调)
滴灌带铺设装置数量	4
滴灌带铺设装置型式	浅埋式
滴灌带铺设装置锁紧方式	自动锁紧

机提供,工作时,玉米播种机使用 89 kW 以上拖拉机牵引,气吸式排种器精量排种,圆盘式开沟器开出种沟,进行播种作业,由独立式覆土镇压轮进行覆土镇压完成播种过程。同时安装在玉米播种单体间的滴灌带浅埋装置进行滴灌带铺设作业,滴灌带浅埋铺设装置工作原理如图 3 所示,正位限深双圆盘开沟器开沟后,滴灌带经滴灌带输送与自动锁紧装置和浅埋铺设装置铺设到离地面 50 mm 深处。当到达地头或遇到特殊情况停车时,自动锁紧装置锁紧滴灌带卷盘,可以防止滴灌带卷盘因惯性继续转动,避

免滴灌带缠绕和拥堵的情况。

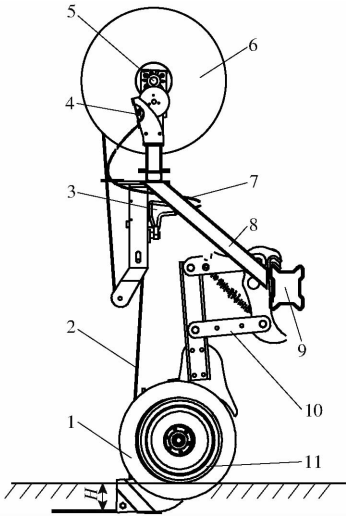


图3 滴灌带浅埋铺设装置工作原理图
Fig.3 Schematic of shallow buried laying device for drip irrigation belt

1. 双圆盘开沟器 2. 滴灌带 3. 液压刹车总泵 4. 液压刹车分泵 5. 滴灌带卷盘转轴 6. 滴灌带卷盘 7. 液压油管 8. 连接架 9. 悬挂横梁 10. 四杆仿形机构 11. 仿形轮

2 关键部件设计

2.1 滴灌带输送装置

滴灌带输送装置包括滴灌带卷盘、带卷支撑轴与带卷导向机构等。将滴灌带输送装置与浅埋铺设装置设计为两个独立的装置,可以方便调节滴灌带输送装置与地面之间的距离。如图4所示,滴灌带卷盘固定于支撑轴上,两端被端盖夹紧,滴灌带穿过导向套,然后进入自动锁紧装置。滴灌带的材质为硬质PE管,直径为16 mm,壁厚0.2 mm,设计滴灌带卷盘宽度为346 mm,满带时每卷滴灌带卷盘满带时质量大约为30.6 kg,每次需人工安装滴灌带卷盘,设计其安装轴心到地面的距离为1 153 mm,可以降低人工操作难度。

为了装卸滴灌带方便,滴灌带支撑轴搭接在两个滑动轴承组成的U形槽内,所以必须避免滴灌带支撑轴在机具作业状态下发生共振脱离搭界面。利用ANSYS Workbench 15.0对支撑轴进行模态分析^[15-16],找出各阶固有频率,选取材质为45号钢,定义模型参数:弹性模量*E*为2.09×10⁵ MPa,泊松比μ₀为0.269,密度ρ为7.85 g/cm³。支撑轴按照简支梁的形式添加约束,一端铰接,另外一端滑动连接。根据工作要求,支撑轴在工作时会承受30.6 kg的负荷,所以在支撑轴上加载垂直向下的306 N的均布载荷。

由于高阶模态很难达到,在分析时通常取前6阶固有频率^[17],分别为339.2、339.8、938.1、939.4、

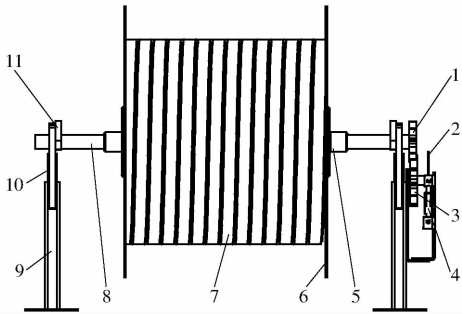


图4 滴灌带输送装置结构简图
Fig.4 Structure diagram of drip irrigation belt conveying device

1. 主动齿轮 2. 制动盘 3. 从动齿轮 4. 液压刹车分泵 5. 端盖 6. 滴灌带卷盘 7. 滴灌带 8. 转轴 9. 支撑架 10. 滑动轴承 11. 限位挡片

1 883.5、1 836.4 Hz,可知滴灌带转轴各阶固有频率随着阶数的增加呈现递增的趋势。如图5a所示,滴灌带卷盘转轴在第1阶固有频率为339.2 Hz,转轴沿径向方向产生弯曲振动,最大变形量为26.938 mm,发生在转轴的中间部位。如图5b所示,第2阶固有频率为339.8 Hz,转轴沿径向方向产生弯曲振动,最大变形量为26.942 mm,发生在转轴的中间部位。若发生共振可能会导致滴灌带转轴脱离轴承支撑面。

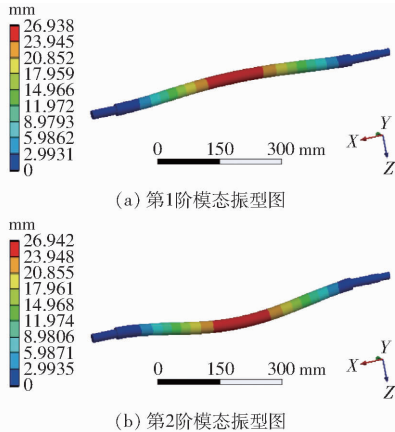


图5 滴灌带卷轴模态分析结果
Fig.5 Modal analysis results of drip irrigation reel

滴灌带支撑轴的转动是机具向前运动时在滴灌带牵引下通过滴灌带卷盘而带动的,由于滴灌带卷盘的半径会因为卷盘上缠绕的滴灌带减少而变小,而滴灌带的输出线速度与拖拉机前进速度保持一致,因此支撑轴的转速会由于卷盘上滴灌带的减少而加快。支撑轴的转动频率为^[11]

$$f_T = 2.78 \frac{v}{\pi D} \tag{1}$$

式中 *f_T*——作业时支撑轴的转动频率,Hz
v——机组作业速度,km/h
D——滴灌带卷盘直径,m

机器的最大作业速度为 6 km/h 左右,由设计要求可知滴灌带卷盘最小直径为 0.12 m,最大直径为 0.47 m。可计算出正常作业时支撑轴的频率范围为 0~44.25 Hz。因此滴灌带盘在工作过程中不会引起轴的共振现象。综上所述,滴灌带支撑轴的设计从模态分析的角度考虑,满足工作要求。

2.2 自动锁紧装置

当机组遇到特殊情况紧急停车时,滴灌带卷盘在自身惯性作用下会继续转动,导致滴灌带松弛甚至拥堵,给连续生产带来不便。为此设计自动锁紧装置,如图 6 所示,滴灌带自动锁紧装置主要由定滑轮、动滑轮、调节弹簧、拉线和制动盘等组成。在紧急停车时通过制动盘锁紧与滴灌带卷盘一同转动的制动片,可以保证滴灌带的溢出量保持在不产生缠绕的范围内。

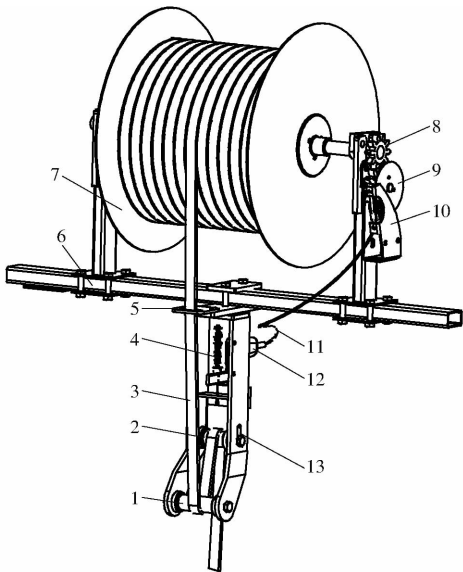


图 6 滴灌带输送与自动锁紧装置结构示意图

Fig. 6 Schematic of drip irrigation belt conveying and automatic locking device

1. 定滑轮 2. 动滑轮 3. 滴灌带 4. 调节弹簧 5. 导向套 6. 安装横梁 7. 滴灌带卷盘 8. 主动齿轮 9. 制动盘 10. 液压刹车分泵 11. 液压油管 12. 液压刹车总泵 13. 垂直导向槽

滴灌带经过导向套从定滑轮和动滑轮向下进入滴灌带仿形铺设单体部分。播种机正常作业时,如图 7 虚线部分所示,滴灌带在拉力下由滴灌带卷盘持续输出,经过定滑轮改变运动方向,带动动滑轮向下运动,通过克服调节弹簧的拉力,带动刹车拉杆向下摆动,拉动液压刹车总泵中的活塞移动并使液压分泵中的液压油回流到液压总泵中,此时,刹车装置松开摩擦片,滴灌带卷盘可以正常作业。当遇到紧急停车时,如图 7 实线部分所示,滴灌带上拉力消失,刹车拉杆在调节弹簧的拉力作用下向上摆动,使液压刹车总泵中的活塞移动并使液压总泵中的液

油通过液压油管输送到液力刹车分泵,使液压分泵总成中的一对活塞受到压力向内移动,推动摩擦片锁紧制动盘,防止滴灌带卷盘因惯性继续转动,避免造成滴灌带缠绕和拥堵的情况。

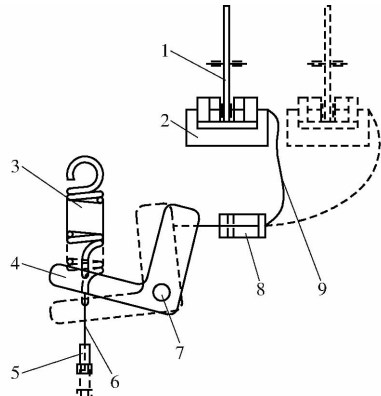


图 7 自动锁紧装置原理图

Fig. 7 Schematic of automatic locking device

1. 制动盘 2. 液压刹车分泵 3. 调节弹簧 4. 刹车拉杆 5. 调节螺钉 6. 拉线 7. 转轴 8. 液压刹车总泵 9. 液压油管

由于滴灌带卷盘与滴灌带质量分布较为均匀,假设滴灌带卷盘满带时为刚体,可以应用刚体动力学理论^[18]对其进行分析。

机组紧急停车时,滴灌带卷盘在自身惯性下继续转动,最终将所有的转动动能转化为热能耗散掉^[12]。在润滑良好的条件下,其他较小的阻力矩可以忽略。做功的主力矩为刹车装置对制动片提供的阻力矩,即

$$\frac{d}{dt}(J\omega) = \sum M \quad (2)$$

其中

$$J = \frac{1}{2}mR^2 \quad (3)$$

式中 J ——滴灌带卷盘相对转轴的转动惯量,kg·m²

ω ——角速度,rad/s

M ——各阻力对刹车片形成的力矩,N·m

m ——滴灌带卷盘的质量,kg

R ——滴灌带卷盘的半径,m

由于滴灌带卷盘和半径随时间发生变化,因此转动惯量 J 随 ω 的变化而变化。为了便于积分,将转动惯量简化,因为开始工作时转动惯量最大,滴灌带溢出量也最大,故对刚开始工作时的状态进行研究。在一小段时间内,滴灌带卷盘的质量变化不大,将其认为是恒定值,即滴灌带卷盘刚安装在机架上的质量。联立式(2)、(3)并积分得

$$\int_{\omega_0}^0 \frac{1}{2}mR^2 d\omega = \int_0^t -Mdt \quad (4)$$

式中 ω_0 ——紧急停车时滴灌带卷盘的角速度,rad/s

t ——停车时滴灌带卷盘停止转动所需时间,s

紧急停车后,滴灌带溢出量为

$$S = \int_0^t R\omega dt = \frac{m\omega_0^2 R^3}{4M} \tag{5}$$

已知 $R = 0.23 \text{ m}$, $m = 30.6 \text{ kg}$, $\omega_0 = 3.9 \text{ rad/s}$, M 作为变量,根据式(5),可以得到滴灌带溢出量与阻力矩的关系图如图 8 所示。为了保证滴灌带的溢出量不至过大,同时保证刹车拉杆在滴灌带正常铺设时可以正常拉动,设计滴灌带的溢出量为 0.2 m ,计算得滴灌带卷盘的阻力矩为 $7.08 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

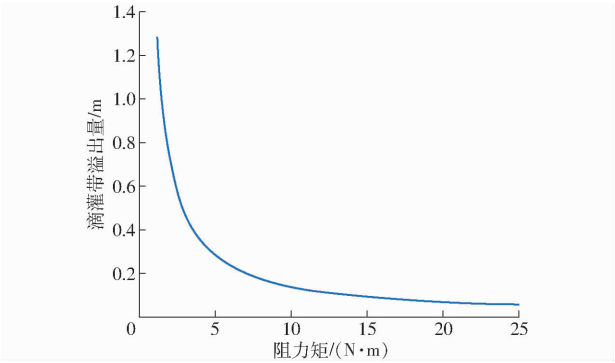


图 8 滴灌带溢出量与阻力矩变化曲线
Fig. 8 Change curves of belt overflow amount and resistance moment for drip irrigation belt

刹车装置是利用液压将作用在刹车拉杆上的力通过制动液传递到摩擦片上,并通过摩擦片与制动盘产生的摩擦力使滴灌带卷盘制动。

刹车装置制动力矩^[19]为

$$M = KN_1R_e \tag{6}$$

其中 $K = n\mu_e \tag{7}$

式中 K ——刹车制动效能因数
 N_1 ——摩擦片作用在制动盘上的压力, N
 R_e ——制动盘有效摩擦半径,为 0.07 m
 n ——刹车工作面数,取 2
 μ_e ——摩擦因数,取 0.4

对液压刹车总泵与分泵中活塞进行受力分析,依据帕斯卡原理有

$$\frac{N_1}{S_1} = \frac{N_2}{S_2} \tag{8}$$

式中 N_2 ——刹车总泵中制动液对活塞的压力, N
 S_1 ——刹车分泵中活塞的受力面积, m^2
 S_2 ——刹车总泵中活塞的受力面积, m^2

图 9 为刹车拉杆在机组正常作业与紧急停车状态时的受力分析图。在紧急停车时,滴灌带对动滑轮的作用力消失,调节弹簧对刹车拉杆的力与液压刹车总泵中活塞对刹车拉杆的力处于平衡状态。在正常作业时,动滑轮轴沿着垂直导向槽向下移动,在下止点受到支持力停止移动,此时液压刹车总泵中活塞受的力很小,可以忽略不计。因此,由平衡条件

得

$$\begin{cases} F_2x_1 - N_2x_2 = 0 \\ F_1 + F_N - F_b = 0 \end{cases} \tag{9}$$

其中 $F_b = 2F_a \tag{10}$

式中 F_1 ——作业时调节弹簧的拉力, N
 F_2 ——停车时调节弹簧的拉力, N
 F_N ——作业时导向槽对动滑轮的支持力, N
 F_a ——作业时滴灌带的拉力,为 42 N
 F_b ——作业时滴灌带对动滑轮的作用力, N
 x_1 —— F_a 的力臂,为 32 mm
 x_2 —— N_2 的力臂,为 26 mm

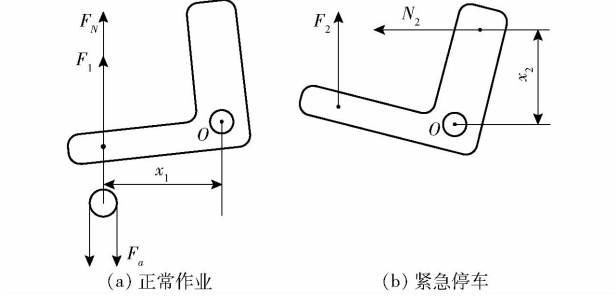


图 9 刹车拉杆受力分析图
Fig. 9 Stress analysis diagrams of brake pull rod

根据设计要求,在上止点调节弹簧拉力为 29 N ,在下止点拉力为 67 N 。弹簧变形量为 35 mm 。由库克定律可得调节弹簧刚度 k_1 为 1.1 N/mm 。

2.3 滴灌带仿形铺设装置

滴灌带铺设深度稳定性是评价滴灌带浅埋铺设装置的重要指标。在滴灌带浅埋铺设作业中,如果地面有起伏,则铺设深度很难保证,影响工作效率和作业质量。滴灌带仿形铺设装置主要采用正位限深与四杆仿形相结合的方式保证滴灌带铺设深度一致,如图 10 所示,主要包括双圆盘开沟器、仿形轮、平行四杆机构、拉力弹簧等。它的工作原理为横梁固定架紧固在播种机横梁上,开沟器支架与横梁固定架及上下连杆形成一个平行四边形机构,在限深轮的支撑下,滴灌带铺设导向轮始终与地面保持一定的深度。

滴灌带仿形铺设装置在铅垂面上的受力示意图如图 11 所示。

滴灌带仿形铺设装置稳定作业时,由受力平衡条件可得

$$F_o\cos\alpha + F_c\cos\alpha + T\cos\gamma - R_x - Q_x - P_x = 0 \tag{11}$$

$$F_o\sin\alpha + F_c\sin\alpha - T\sin\gamma - G + R_y + Q_y + P_y = 0 \tag{12}$$

其中 $P_x = P_y = F_a \tag{13}$

$$Q_x = Q_yf \tag{14}$$

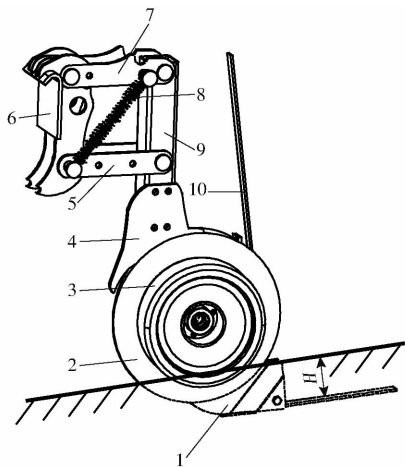


图 10 滴灌带仿形铺设装置工作原理图

Fig. 10 Working principle diagram of drip irrigation belt copying laying device

1. 整平铲 2. 双圆盘开沟器 3. 仿形轮 4. 连接板 5. 下拉杆 6. 机架挂结板 7. 上拉杆 8. 拉力弹簧 9. 后连接拉杆 10. 滴灌带

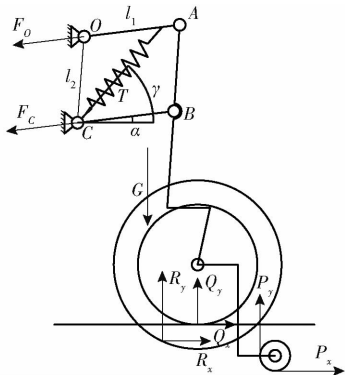


图 11 滴灌带仿形铺设装置受力示意图

Fig. 11 Stress diagram of drip irrigation belt copying laying device

式中 F_o 、 F_c ——上、下拉杆拉力, N
 T ——拉力弹簧受力, N
 G ——滴灌带仿形铺设装置重力, 为 370 N
 R_x 、 R_y ——开沟器受力的水平、竖直分力, N
 Q_x 、 Q_y ——仿形轮受力的水平、竖直分力, N
 P_x 、 P_y ——滴灌带在水平与竖直方向对导向轮的力, N
 α ——横拉杆与水平方向的夹角, ($^\circ$)
 γ ——拉力弹簧与水平方向的夹角, ($^\circ$)
 f ——仿形轮的滚动摩擦因数

根据式(11)~(14)得

$$\frac{G - R_y - R_x \tan \alpha + T(\sin \gamma + \cos \gamma \tan \alpha) - F_a(1 + \tan \alpha)}{1 + f \tan \alpha} \tag{15}$$

滴灌带仿形浅埋铺设装置在田间作业时, 要保证铺设深度, 则仿形轮必须有一定的下压力, 即

$Q_y > 0$, 由式(15)可得滴灌带仿形浅埋铺设装置重力范围为

$$G > R_y + R_x \tan \alpha + F_a(1 + \tan \alpha) - T(\sin \gamma + \cos \gamma \tan \alpha) \tag{16}$$

如果不安装拉力弹簧时滴灌带浅埋铺设装置重力范围为

$$G > R_y + R_x \tan \alpha + F_a(1 + \tan \alpha) \tag{17}$$

与不安装拉力弹簧相比, 滴灌带仿形浅埋铺设装置重力最小值减少量为

$$\Delta G = T(\sin \gamma + \cos \gamma \tan \alpha) \tag{18}$$

由式(16)~(18)可见, 滴灌带仿形浅埋铺设装置安装拉力弹簧后, 可以抵消滴灌带对铺设仿形装置向上提升的趋势, 减轻开沟器入土对装置重量的依赖, 对机具的轻量化设计十分有利^[20]。

以滴灌带仿形铺设装置稳定工作为前提条件, 依据实际作业条件来确定四杆仿形机构的尺寸。仿形机构的仿形量是依据当地的地形地貌和地表状况来确定的^[21-22]。一般情况下, 上、下仿形量均为 80~100 mm。平行四杆仿形机构如图 12 所示。

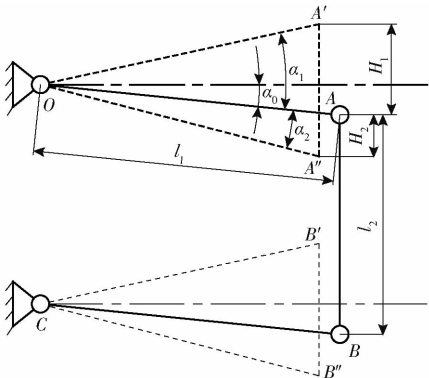


图 12 平行四杆仿形机构极限位置示意图

Fig. 12 Schematic of copying limit position of parallel four-bar mechanism

由图 12 可知, 平行四杆仿形机构上下总仿形量 H_I 为

$$H_I = H_1 + H_2 = l_1(\sin(\alpha_1 - \alpha_0) + \sin(\alpha_0 + \alpha_2)) \tag{19}$$

式中 H_1 ——上仿形量, mm
 H_2 ——下仿形量, mm
 l_1 ——上拉杆长度, mm
 α_0 ——初始工作角, ($^\circ$)
 α_1 ——上仿形角, ($^\circ$)
 α_2 ——下仿形角, ($^\circ$)

由式(19)可知, 在总仿形量相同的情况下, 如果四杆仿形机构的上拉杆长度 l_1 越小, 则牵引角 α 的变化范围就越大; 如果四杆仿形机构的上拉杆长度 l_1 越大, 则牵引角 α 的变化范围就越小。从滴灌

带浅埋仿形铺设装置在田间作业的稳定性角度来考虑,牵引角 α 的变化范围越小,机具的作业稳定性就越好。即增加上拉杆长度 l_1 对机具稳定性有利。但在玉米宽窄行种植模式中,滴灌带浅埋铺设装置安装在两个播种单体之间的前侧,播种单体与横梁通过四杆仿形机构连接,播种单体上拉杆长度为518 mm,如果滴灌带铺设装置上拉杆长度过长,则会导致滴灌带仿形铺设装置与播种单体产生干涉。参照《农业机械设计手册》^[23],依据本文滴灌带浅埋仿形铺设装置特点设计 $\alpha_1 = 20^\circ, \alpha_0 = 0, \alpha_2 = 20^\circ$,两连杆架间距离 $l_2 = 200$ mm。

由图 12 可知,仿形杆长度为

$$l_1 = \frac{H_2}{\sin(\alpha_2 + \alpha_0) - \sin\alpha_0} \tag{20}$$

选择下仿形量为 80 mm,将 α_0, α_2 取值代入式(20)得 $l_1 = 234$ mm,取 $l_1 = 240$ mm,则可以得到上仿形量为

$$H_1 = l_1(\sin(\alpha_1 - \alpha_0) + \sin\alpha_0) \tag{21}$$

由式(21)得 $H_1 = 82$ mm,满足仿形量 80 ~ 100 mm 的要求。

对于仿形拉力弹簧,设弹簧刚度为 k_2 ,弹簧变形量为 Δl ,则弹簧拉力为

$$T = k_2 \Delta l \tag{22}$$

安装拉力弹簧时,需要保证滴灌带浅埋在地下一定深度时弹簧具有一定的预紧力。如果预紧力过小,就会在下仿形时导致下压力矩不够,出现开沟深度过浅的情况。所以,拉力弹簧的预紧力需要满足下仿形时仿形轮对地面的压力 $Q_y > 0$,由式(15)得

$$\begin{aligned} &G - R_y - R_x \tan(\alpha_0 + \alpha_2) + \\ &T(\sin\gamma + \cos\gamma \tan(\alpha_0 + \alpha_2)) - \\ &F_a(1 + \tan(\alpha_0 + \alpha_2)) > 0 \end{aligned} \tag{23}$$

联立式(22)、(23)得

$$k_2 > \frac{R_y + R_x \tan(\alpha_0 + \alpha_2) + F_a(1 + \tan(\alpha_0 + \alpha_2)) - G}{(\sin\gamma + \cos\gamma \tan(\alpha_0 + \alpha_2)) \Delta l} \tag{24}$$

从式(24)可以看出,仿形拉力弹簧刚度与滴灌带仿形铺设装置重力、四杆仿形机构尺寸、滴灌带铺设过程中滴灌带的拉力以及开沟器的工作阻力等因素有关。为保证在下仿形作业时的铺设效果,拉力弹簧刚度应该大于临界值。但如果拉力弹簧刚度过大,则在上仿形作业时会导致仿形轮下陷严重,使滴灌带铺设过深。根据文献[24],开沟器水平阻力为 441 ~ 784 N,竖直阻力为 686 ~ 980 N,设计计算取 $R_x = 600$ N, $R_y = 800$ N。下仿形时弹簧变形量经计算为 58 mm,由式(24)得仿形弹簧刚度 $k_2 > 14.3$ N/mm。设计仿形拉力弹簧刚度 k_2 为 15 N/mm,可以保证在

预拉力满足的条件下在上仿形时仿形轮合理的下陷量。

2.4 开沟装置

开沟装置是滴灌带浅埋铺设过程中重要的人土作业部件,开沟器型式与参数的合理选择对滴灌带铺设质量有重要作用。选用双圆盘式开沟器,该开沟器通过依靠机具重量和增加附加载荷提高切土和入土的能力,倾斜的开沟圆盘入土后,随着机具的前进将土壤向两侧进行挤压,整理出合适的沟形^[25]。

开沟装置结构简图如图 13 所示,主要包括滴灌带导向轮、整平铲、仿形轮以及位置调节装置等。两个仿形轮分别固定在两个开沟圆盘的圆心处,滴灌带铺设装置作业时,仿形轮与开沟圆盘共同转动。

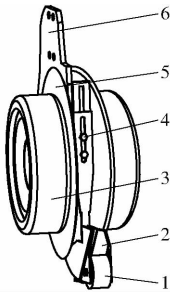


图 13 双圆盘开沟装置结构图

Fig. 13 Structure diagram of double disc trenching device

1. 滴灌带导向轮 2. 整平铲 3. 仿形轮 4. 位置调节装置 5. 双圆盘开沟器 6. 安装板

为保证理想的开沟深度,设计仿形轮直径为 290 mm,宽度为 80 mm。

如图 14 所示,两个开沟圆盘以圆盘夹角 β 对称安装在开沟器轴上,作业过程中,聚点 M 应位于地面稍上位置,若聚点位置过低,则会造成开沟圆盘堵塞,加剧轴承的磨损程度,聚点过高就会造成开出的沟宽过大,并且底部凸起会变大,滴灌带铺设效果变差^[26]。因此,聚点的高度对开沟圆盘的作业性能具有较大影响。一般情况下,聚点位置夹角 δ 取值范围为 $55^\circ \sim 75^\circ$ 。

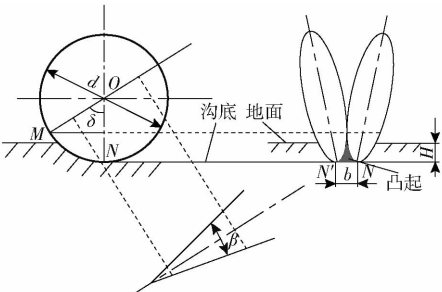


图 14 双圆盘开沟装置结构示意图

Fig. 14 Schematic of double disc ditching device

开沟宽度不仅与聚点 M 的高度有关,还与圆盘

夹角 β 、圆盘直径 d 有密切关系。根据《农业机械设计手册》^[23], 可知双圆盘开沟器开沟宽度 b 为

$$b = d(1 - \cos\beta) \sin \frac{\delta}{2} \quad (25)$$

由于滴灌带直径一般为 16 mm, 依据实际生产经验, 设计开沟圆盘直径 $d = 390$ mm, 圆盘夹角 $\beta = 16^\circ$, 聚点夹角 $\delta = 60^\circ$ 。由式 (25) 可得, 双圆盘开沟装置所开滴灌带铺设沟宽 $b = 27$ mm。

双圆盘开沟器开出的沟底有凸尖, 当 φ 越来越大、点 M 越高时, 凸尖就越大, 沟底明显分成两行, 即沟底形状为“W”形而非“U”形^[27]。设计一种导向铺设压实装置, 对双圆盘开沟装置开出的沟底形状进行压实和重塑, 优化整备带沟形貌, 为滴灌带浅埋铺设提供一个良好的沟底环境。

导向铺设压实装置位于双圆盘开沟装置的后下方, 由滴灌带导向轮、整平铲以及支撑架等组成。作业时, 导向铺设压实装置跟随机组向前运动, 如图 15 所示, 整平铲可以破坏掉双圆盘开沟器作业后留在沟底的突起并压实土壤, 形成一条沟底平滑的“U”形带沟, 位于后方的滴灌带在导向轮的引导下铺设在沟底。

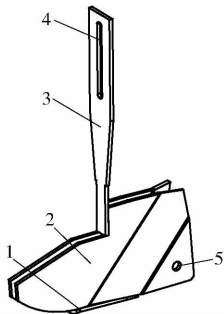


图 15 整平铲结构图

Fig. 15 Structure diagram of leveling shovel

1. 底板 2. 安装侧板 3. 连接竖杆 4. 位置调节槽 5. 导向轮安装孔

3 田间试验

3.1 试验条件

田间试验地点为莱州市经济技术开发区王家村农场。将浅埋滴灌带玉米精量播种机播种单体窄行与宽行行距分别调整为 400 mm 与 600 mm, 把 2 个滴灌带浅埋铺设装置分别安装在外侧两个窄行相邻播种单体中间位置。试验地土壤类型为壤土。选用内镶式滴灌带, 土壤坚实度为 1.94×10^5 kPa, 土壤含水率为 13.35%, 容重为 $1.06 \sim 1.15$ g/cm³, 拖拉机的配套动力为 89 kW。试验时配置钢板尺、电子秤、卷尺以及秒表等仪器。田间试验情况如图 16 所示。



图 16 样机田间试验

Fig. 16 Field experiments of prototype

3.2 试验方案与方法

试验选取地块长度为 50 m, 地头两端预留 10 m。每一次工作行程前将滴灌带的一端用土压实, 机具作业速度为 4 ~ 6 km/h。一共进行 5 次往返行程试验, 每次作业行程结束时紧急停车。在滴灌带铺设作业时, 主要考察滴灌带铺设是否顺畅, 是否会因拖拉机的速度波动而产生堆积缠绕等现象。试验完成后, 结合实际情况, 主要选取滴灌带铺设深度合格率 Y_1 、铺设深度变异系数 Y_2 、覆土量 Y_3 等试验指标来考察滴灌带浅埋铺设装置的作业性能。

每次试验后随机选择 20 点测量铺设深度 H_i , 设理论深度为 H_r , 若 $0.8H_r < H_i < 1.2H_r$, 则认为该点铺设深度合格。

每次试验后随机选择 20 点测量铺设深度, 计算其铺设深度变异系数。

在每次试验后随机选取 3 段长度为 1 m 的田间铺设距离, 测量覆于滴灌带上部土的质量, 取算术平均值, 作为此次作业行程的覆土量。

3.3 试验结果与分析

通过田间试验, 对玉米播种机滴灌带浅埋铺设装置的作业性能进行了测定。在机具作业过程中, 滴灌带输送顺畅, 当拖拉机紧急停车时, 滴灌带输送自动锁紧装置可即时制动, 滴灌带没有发生堆积、缠绕现象。试验结果表明, 滴灌带铺设深度合格率为 93.0%, 满足机具检测要求铺设深度合格率高于 90% 的指标。铺设深度变异系数为 22.3%, 覆土量为 619.5 g, 滴灌带铺设深度稳定性良好, 能够满足滴灌带浅埋铺设的要求。

4 结论

(1) 基于滴灌区玉米宽窄行种植模式, 设计了一种适用于玉米播种机的滴灌带浅埋铺设装置。该装置在机组紧急停车时可以及时锁紧滴灌带卷盘的转动, 有效防止了滴灌带缠绕、堆积现象的发生。并且可以实现仿形浅埋铺设, 保证了滴灌带铺设深度的一致性。

(2) 对关键部件进行了设计与分析, 通过对滴灌带卷盘转轴的模态分析可知, 在正常作业状态下不会引起轴的共振现象。对液压刹车装置进行了理

论分析与计算,明确了影响紧急停车时滴灌带溢出的关键因素。对四杆仿形机构与仿形调节弹簧进行了作业参数的设计,通过与仿形轮联合作业,可以提高地形适应性。设计的整平铲可以对双圆盘开沟器开出的沟底形状进行压实和重塑,为滴灌带浅埋铺设提供一个良好的沟底环境。

(3)田间试验结果表明,在机组前进速度为4~6 km/h时,滴灌带浅埋铺设装置铺设滴灌带的深度合格率为93.0%,铺设深度变异系数为22.3%,覆土量为619.5 g。在作业过程中,滴灌带输送顺畅,当拖拉机紧急停车时,滴灌带输送自动锁紧装置可及时制动,有效消除了滴灌带的堆积、缠绕现象。

参 考 文 献

- [1] 要家威,齐永青,李怀辉,等. 地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(6): 1076-1084.
YAO Jiawei, QI Yongqing, LI Huaihui, et al. Water saving potential and mechanisms of subsurface drip irrigation: a review [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1076-1084. (in Chinese)
- [2] 楚杰,路海东,薛吉全,等. 玉米宽窄行深旋免耕精量播种机田间试验及效果[J]. 农业工程学报,2014,30(14):34-41.
CHU Jie, LU Haidong, XUE Jiquan, et al. Field experiment and effect of precise mechanical sowing of maize based on wide-narrow row deep rotation and no-tillage technology[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 34-41. (in Chinese)
- [3] 姚文燕,刁培松,张银平,等. 两熟区小麦玉米种植模式对机械化作业的影响[J]. 农机化研究,2021,43(4):255-262.
YAO Wenyang, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Effect of wheat and maize planting modes on mechanized operation in double cropping areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4): 255-262. (in Chinese)
- [4] ZHU H, BUTTS C L, LAMB M C, et al. An implement to install and retrieve surface drip irrigation laterals[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(1): 17.
- [5] 王睿,李鹏,王文娥. 水肥一体化下不同滴灌带配置对玉米产量的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(5):327-333.
WANG Rui, LI Peng, WANG Wene. Effects of different drip irrigation belts distributions on maize yield under water and fertilizer integration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 327-333. (in Chinese)
- [6] 牛琪,王士国,陈学庚. 膜下滴灌水稻穴直播机研究[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):90-95,102.
NIU Qi, WANG Shiguo, CHEN Xuegeng. Design of rice planter with plastic film mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 90-95, 102. (in Chinese)
- [7] 张中锋,石林雄,史芳志,等. 2BMK-6型铺膜铺管施肥播种机的设计与试验[J]. 中国农机化学报,2019,40(11):13-19.
ZHANG Zhongfeng, SHI Linxiong, SHI Fangzhi, et al. Design and test on 2BMK-6 type film and tube spreading fertilization and seeding machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 13-19. (in Chinese)
- [8] 蒋贵菊,王军,曾桂芳. 玉米破茬与浅埋滴灌带装置的设计[J]. 农业开发与装备,2020(7):24,37.
- [9] 王小瑜,康建明,丁汉凤,等. 2BM-4型藜麦覆膜精量播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12):86-94.
WANG Xiaoyu, KANG Jianming, DING Hanfeng, et al. Design and test of 2BM-4 film mulch precision planter for quinoa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 86-94. (in Chinese)
- [10] 田佰亮,杨悦乾,赵淑红,等. 高垄平台滴灌带铺设机的设计与试验[J]. 农机化研究,2013,35(2):69-72.
TIAN Bailiang, YANG Yueqian, ZHAO Shuhong, et al. The design and test of machine of laying the drip tape on the high ridging platform[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(2): 69-72. (in Chinese)
- [11] 李强. 玉米移栽机滴灌带铺设装置设计与试验研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
LI Qiang. Development and transplanting experiment of drip irrigation device for maize transplanting[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [12] 陈伟. 马铃薯播种铺管机滴灌带浅埋装置的设计与试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
CHEN Wei. Design and experimental study on the shallow burying device of drip tape on potato planter and drip tape layer [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [13] 王静静,贺洪军,张自坤,等. 宽行窄幅错位密播种植方式对夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学,2017,25(3): 65-72,79.
WANG Jingjing, HE Hongjun, ZHANG Zikun, et al. Effects of wide-narrow row interlaced thick-planting pattern on photosynthetic characteristic and yield in summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(3): 65-72, 79. (in Chinese)
- [14] 袁盼盼,李洪文,蒋贵菊,等. 滴灌区宽窄行玉米免耕播种带秸秆清理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6): 43-52.
YUAN Panpan, LI Hongwen, JIANG Guiju, et al. Design and experiment of straw cleaning device for wide-narrow maize no-tillage sowing strip in drip irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 43-52. (in Chinese)
- [15] 韩清凯,翟敬宇,张昊. 机械动力学基础及其仿真方法[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2017.
- [16] 周炬,苏金英. ANSYS Workbench 有限元分析实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2017.
- [17] 刘双喜,徐春保,张宏建,等. 果园开沟施肥机架优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):113-122.
LIU Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Optimization design and experiment for rack of orchard ditching-fertilizer

machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):113-122. (in Chinese)

[18] 金江,袁继峰,葛文璇,等. 理论力学[M]. 南京:东南大学出版社,2019.

[19] 李顺. PSZ75 液压盘式刹车系统的设计与研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2016.
LI Shun. Research and design on the hydraulic disc brake of the PSZ75[D]. Qingdao:China University of Petroleum(East China),2016. (in Chinese)

[20] 刘艳芬,林静,李宝筏. 轻量化玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):60-69.
LIU Yanfen,LIN Jing,LI Baofa. Design and experiment on lightweight maize ridge planting no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):60-69. (in Chinese)

[21] 贾洪雷,姜鑫铭,郭明卓,等. 2BH-3 型玉米行间播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(3):83-89.
JIA Honglei,JIANG Xinming,GUO Mingzhuo,et al. Design and experiment of type 2BH-3 inter-row seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):83-89. (in Chinese)

[22] 侯守印,陈海涛,史乃煜,等. 双自由度多铰接仿形免耕精量播种单体设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):92-101.
HOU Shouyin,CHEN Haitao,SHI Naiyu,et al. Design and experiment of two-degree-of-freedom multi-articulated profiling no-tillage precision drill unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):92-101. (in Chinese)

[23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[24] 蒋金琳,龚丽农,王明福. 免耕播种机单体工作性能试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(5):64-66.
JIANG Jinlin,GONG Linong,WANG Mingfu. Study on the working performance of the no-tillage planter unit[J]. Transactions of the CSAE,2000,16(5):64-66. (in Chinese)

[25] 禹栋栋. 免耕播种机双圆盘开沟器结构参数对作业性能影响研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
YU Dongdong. The study structural parameters of double disc opener of no-tillage on operating performance[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2017. (in Chinese)

[26] 刘文政,何进,李洪文,等. 马铃薯微型种薯种植机双侧位深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):56-65.
LIU Wenzheng,HE Jin,LI Hongwen,et al. Design and experiment of double-side deep fertilizing device for potato micro-seed planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):56-65. (in Chinese)

[27] 王文君. 玉米优质种床构建关键技术及行间耕播机研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
WANG Wenjun. Research on key technologies of constructing high-quality maize seedbed and its inter-row till-planter[D]. Changchun: Jilin University,2019. (in Chinese)

(上接第 79 页)

[15] 常金丽,张晓辉. 2BQ-10 型气流一阶集排式排种系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2011,27(1):136-141.
CHANG Jinli,ZHANG Xiaohui. Design and test of one-step centralized type pneumatic seeding system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 136-141. (in Chinese)

[16] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Comparative energy study of the air-stream loading systems of air-seeders[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2018, 11(1): 30-37.

[17] KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. J. Agric. Engng. Res., 2000, 75(1): 81-95.

[18] 李衍军,刘友华,刘立晶. 气送式播种机输种管长度影响管内气流分布的机理分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 55-64.
LI Yanjun, LIU Youhua, LIU Lijing. Distribution mechanism of airflow in seed tube of different lengths in pneumatic seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 55-64. (in Chinese)

[19] 余洲生. 气力输送及其应用[M]. 北京:人民交通出版社,1989.

[20] 胡克吉. 气力输送系统文丘里供料器的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学,2013.
HU Keji. The research on Venturi feeder in pneumatic conveying system[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology,2013. (in Chinese)

[21] 韩启彪,黄兴法,刘洪禄,等. 6 种文丘里施肥器吸肥性能比较分析[J]. 农业机械学报,2013,44(4):113-117,136.
HAN Qibiao, HUANG Xingfa, LIU Honglu, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six Venturi injectors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 113-117, 136. (in Chinese)

[22] 吴健伟. 粉煤灰气力输送喷射器的设计及应用[J]. 应用能源技术,2010(10):40-42.
WU Jianwei. Flyash pneumatic conveying design and application of spray[J]. Applied Energy Technology, 2010(10): 40-42. (in Chinese)

[23] 周乃如. 气力输送原理与设计计算[M]. 郑州:河南科学技术出版社,1981.

[24] JIA Wenguang, YAN Jinglu. Pressure drop characteristics and minimum pressure drop velocity for pneumatic conveying of polyacrylamide in a horizontal pipe with bends at both ends[J]. Powder Technology, 2020, 372(7): 192-203.

[25] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 150(6): 98-109.