

气动式播种下压力调节装置优化设计与试验

曹鑫鹏^{1,2} 王晨^{1,2} 彭晨^{1,2} 王金星^{1,2} 张宏建^{1,2} 孙林林^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对机械化播种作业过程中地表起伏造成的播种下压力波动、开沟深度稳定性差问题,设计了一种气动式播种下压力调节装置,并分析了该装置运动过程,明确了其主要工作部件下压力空气弹簧扭转变形过程,对播种下压力影响因素和下压力仿形空气弹簧变形过程进行分析,确定了影响播种下压力稳定性空气弹簧主要结构参数为帘线角、活塞半径和活塞锥角。建立了空气弹簧气固耦合有限元仿真模型,以提高播种下压力稳定性为优化指标,进行二次旋转正交组合仿真试验,建立了试验指标与影响因素的回归模型,确定下压力空气弹簧最优结构参数组合:帘线角为 38°、活塞半径为 42 mm、活塞锥角为 23°。在最优参数组合下对气动式播种下压力调节装置进行田间试验,试验结果表明,气动式相较于螺旋弹簧式播种下压力调节装置能够有效提高开沟深度稳定性,当作业速度为 4、8、12 km/h 时,开沟深度合格率分别提高 8、3、11 个百分点,开沟深度变异系数平均降低 2.58 个百分点,提高了机械化播种时的播深一致性。

关键词: 下压力调节装置; 气动式; 播种

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)05-0257-11

OSID:



Optimization Design and Experiment of Pneumatic Seeding Downforce Regulating Device

CAO Xinpeng^{1,2} WANG Chen^{1,2} PENG Chen^{1,2} WANG Jinxing^{1,2} ZHANG Hongjian^{1,2} SUN Linlin^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: A pneumatic seeding downforce regulating device was designed to reduce pressure fluctuations caused by surface undulations during mechanized sowing operations, which reduced the stability of seeding depth. The motion process of downforce regulating device was analyzed, and the torsional deformation process of the air spring which was the main working component was clarified. The main structural parameters of the air spring that affected the seeding downforce stability were determined through analyzing the influencing factors of seeding downforce and the deformation process of the air spring, including cord angle, piston radius, and piston angle. In order to determine the optimal parameter combination, a finite element simulation model for gas-solid coupling of air springs was established. Taking improving the downforce stability as the optimization index, a quadratic rotation orthogonal combination simulation experiment was conducted, and a regression model of test indicators and influencing factors was established. Following the principle of reducing the vertical stiffness and ensuring that the vertical output downforce of the air spring met the requirements, the optimal parameter combination for the downforce air spring were determined by simulation experiment: cord angle was 38°, piston radius was 42 mm, piston angle was 23°. To verify the effectiveness of theoretical analysis and simulation experiments, the field experiments were conducted on the pneumatic seeding downforce regulating device under the optimal parameter combination, the experimental results showed that the pneumatic seeding downforce regulating device can effectively improve the stability of ditch depth compared with the spiral spring seeding downforce regulating device. When the operating speed was 4 km/h, 8 km/h, and 12 km/h, the qualified rates of ditch depth were increased by 8, 3 and 11 percentage points

收稿日期: 2024-11-21 修回日期: 2024-12-18

基金项目: 山东省农机装备研发创新计划项目(2016YF007)和山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202314)

作者简介: 曹鑫鹏(1996—),男,博士后,主要从事智能农业装备与技术研究, E-mail: caoxinpeng@sdau.edu.cn

通信作者: 王金星(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备与技术研究, E-mail: jinxingw@163.com

respectively, reducing the coefficient variation of ditch depth by an average of 2.58 percentage points, which significantly improved the consistency of seeding depth during mechanized seeding.

Key words: downforce regulating device; pneumatic; seeding

0 引言

播种深度直接影响玉米种子萌发、出苗及生长发育^[1-2],均匀播种深度可提高出苗一致性,发挥玉米群体产量提升优势,是实现玉米稳产增产的重要保证^[3-5]。播种下压力即开沟限深轮所承担的下压力,对播种深度及其一致性影响显著^[6]。播种下压力过小易造成种沟两侧土壤疏松,播种圆盘开沟深度不足,播种深度过浅。因此,现有精量播种机通常在播种单体上施加额外的下压力以保证播种深度稳定,但下压力过大易造成种沟土壤过度压实,破坏土壤孔隙结构,阻碍玉米发芽及根系生长发育,限制玉米播种质量提升。

为提高播种下压力稳定性,现有玉米精量播种机普遍配备被动式下压力调节装置为播种单体施加额外的下压力,通过螺旋弹簧被动伸缩实现播种下压力仿形^[7-8]。但播种作业前需根据播种深度和土壤质地等条件对螺旋弹簧预紧力及安装数量进行预调整,作业过程中无法实现播种下压力主动调节。随着玉米播种作业向精量化高速化和智能化方向发展,主动式下压力调节技术已成为提升玉米播种质量的重要保障^[9]。

主动式下压力调节装置按照工作部件主要分为气动式、液压式和推杆式3种,其中气动式使用空气弹簧代替螺旋弹簧进行播种下压力仿形,作业过程中通过对空气弹簧充放气调节内部气压实现下压力主动调节^[10-11];液压式使用液压缸直接推动或提升播种单体的方式对播种下压力进行调节^[12-15];推杆式选择使用电动推杆作为主要工作部件,工作原理与液压式类似,但田间连续作业稳定性有待进一步验证^[16-17]。气动式下压力调节装置相较于液压式具有减振性能好和安装使用成本低等优势,国内外现有研究主要集中于空气弹簧应用及测控系统开发。黄东岩等^[18]使用空气弹簧代替螺旋弹簧进行播种下压力调节,并开发了基于压电薄膜的播种下压力控制系统;高原源等^[19]选用A180型袖套式车用空气弹簧代替螺旋弹簧进行播种下压力调节,并开发了相应的播种下压力测控系统;国内外农机企业如顺源、John Deere和Kinze等公司均开发有采用双曲囊式或膜式空气弹簧气动式播种下压力调节系统^[20-22]。现有研究或应用中通常直接采用现有道路车辆上所使用的空气弹簧,下压

力空气弹簧本身结构参数与播种下压力稳定性之间的关系尚未明确,未对空气弹簧本身结构参数进行优化,限制气动式播种下压力仿形效果的进一步提升。

针对上述问题,本文分析气动式下压力调节装置中空气弹簧工作过程,利用有限元仿真方法研究下压力空气弹簧关键结构参数对播种下压力稳定性影响规律,优化设计空气弹簧结构参数,以提高机械化播种作业过程中播种下压力稳定性。

1 气动式播种下压力调节装置工作原理

气动式播种下压力调节装置结构如图1所示,主要由空气弹簧、上固定支架、下固定托板和仿形连杆等构成。空气弹簧上端通过上固定支架与播种机机架固定,下端通过下固定托板与四连杆铰接。仿形过程中空气弹簧在四连杆的带动下被压缩或拉伸,变形过程中空气弹簧下安装面与上安装面始终保持平行。

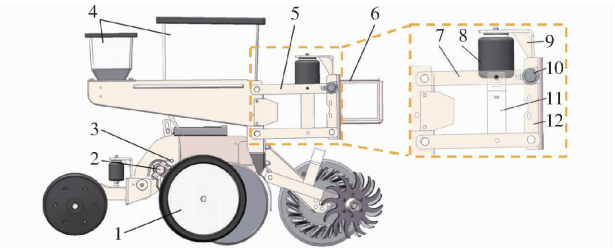


图1 气动式播种下压力调节装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of pneumatic downforce regulating device

- 1. 开沟限深轮 2. 限深轮支臂角度传感器 3. 销轴压力传感器
- 4. 种肥箱 5. 气动式播种下压力调节装置 6. 播种机机架
- 7. 仿形四连杆 8. 下压力空气弹簧 9. 上固定支架 10. 四连杆
- 角度传感器 11. 下固定托板 12. 播种单体连接板

播种作业过程中,播种单体通过气动式播种下压力调节装置与机具机架连接,随着播种带地表起伏,播种单体在四连杆作用下上下仿形带动下压力空气弹簧变形。为实现播种单体下压力检测,在限深轮处安装有角度传感器与销轴式压力传感器,以实现播种下压力实时检测。为实现播种下压力精准调节,在四连杆处安装角度传感器用于计算空气弹簧工作高度;同时使用气压传感器对空气弹簧内部气压进行测量;建立气动式下压力调节装置输出下压力拟合模型,实现不同高度与气压下输出下压力计算。播种作业过程中,以开沟限深轮所检测播种

下压力为依据,以调节不同高度空气弹簧内部气压为途径,对空气弹簧垂向输出下压力进行调节,进而实现对播种下压力调节。

2 播种下压力稳定性

播种作业过程中播种单体在地表不平度的作用下带动下压力调节装置上下起伏,播种下压力稳定性受下压力调节装置和播种带地表不平度作用共同影响,因此不同工作高度下播种下压力调节装置输出下压力是决定播种下压力稳定性的关键。播种作业过程中,地表不平度作用下下压力调节装置运动与播种下压力波动主频集中于 $0 \sim 1$ Hz 低频范围内,同时空气弹簧在此范围低频振动作用下动刚度与静刚度无显著波动^[23-25],因此对下压力调节装置不同工作位置时下压力静态输出值进行分析,明确播种下压力稳定性影响规律。

2.1 气动式播种下压力调节装置运动分析

气动式播种下压力调节装置运动范围受四连杆仿形机构限制,以仿形连杆水平位置为中点,其运动过程主要分为上仿形与下仿形,分别对应空气弹簧拉伸与压缩两阶段。气动式下压力调节装置仿形过程如图2所示,当四连杆与竖直方向夹角大于 90° 时,空气弹簧被拉伸,由空气弹簧力学特性可知,随着空气弹簧被拉伸,其输出下压力理论值减小,播种下压力降低;当四连杆与竖直方向夹角小于 90° 时,随着空气弹簧被压缩,其输出下压力理论值增大,播种下压力增大。

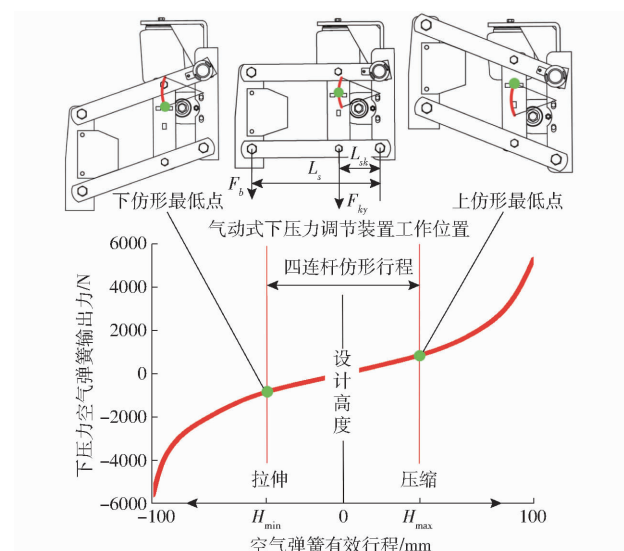


图2 气动式播种下压力调节装置工作过程

Fig. 2 Working process of pneumatic downforce regulating device

忽略四连杆仿形偏转过程中的摩擦阻力,由空气弹簧相对安装位置可得气动式播种下压力调节装

置输出下压力

$$F_b = \frac{F_{ky} L_{sk}}{L_s} \quad (1)$$

式中 F_b ——空气弹簧输出下压力, N
 F_{ky} ——空气弹簧垂向输出力, N
 L_{sk} ——空气弹簧作用力臂长度, m
 L_s ——四连杆长度, m

由式(1)可得,当空气弹簧安装参数确定时,随着四连杆扭转角度变化,下压力调节装置输出下压力与空气弹簧垂向输出力呈正相关,下压力空气弹簧在工作行程范围内垂向输出力是决定播种下压力的关键。

2.2 下压力空气弹簧变形过程分析

空气弹簧大体可分为囊式和膜式两类,相较于囊式空气弹簧,膜式空气弹簧具有承载特性易调节、固有频率低的特性,因此现有气动式播种下压力调节装置多选用膜式空气弹簧作为主要下压力仿形部件^[16-17]。膜式下压力空气弹簧结构如图3所示,主要由上盖板、压环、橡胶皮囊及活塞组成。

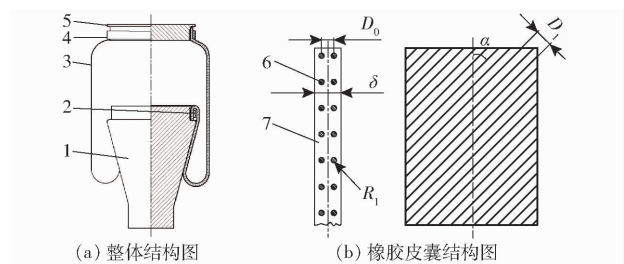


图3 下压力空气弹簧结构示意图

Fig. 3 Structure diagrams of downforce air spring

1. 活塞 2. 压环 3. 橡胶皮囊 4. 压环 5. 盖板 6. 帘线 7. 橡胶

研究表明,空气弹簧工作过程中其垂向输出力主要受空气弹簧内部气压及有效面积的影响,计算式为

$$F_k = \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^\lambda (p_0 + p_a) - p_a \right] A_e \quad (2)$$

式中 p_a ——大气压力, MPa
 p_0 ——中间高度空气弹簧内部压力, MPa
 V_0, V ——中间高度与任意高度空气弹簧内部容积, m^3
 λ ——多变指数
 A_e ——下压力空气弹簧有效面积, m^2

其中当空气弹簧以低于频率 0.1 Hz 运行时多变指数 λ 为 1, 高于频率 30 Hz 运行时取 1.4, 实际中根据镇压轮工作情况取 1.33^[26]。

将式(2)对垂直变形量求导可得下压力空气弹簧垂向刚度 k , 对于微振动中有 $V/V_0 \approx 1$, 同时利用 $dV/dx = A_e$ 得到空气弹簧垂向刚度表达式为

$$k = \frac{\lambda A_e^2 (p_0 + p_a)}{V_0} + p_0 \frac{dA_e}{dx} \quad (3)$$

由式(3)可知,在内部气压不变情况下,空气弹簧刚度变化主要由变形过程中的有效面积、有效面积变化率引起。下压力空气弹簧变形过程中橡胶皮囊在内部气压作用下压紧活塞表面,随着橡胶皮囊与活塞表面接触点的变化,空气弹簧有效面积及有效面积变化率改变。由空气弹簧几何关系可得

$$A_e = \pi R_r \quad (4)$$

式中 R_r ——空气弹簧有效工作半径,m

对下压力空气弹簧工作过程中的有效工作半径进行分析,空气弹簧活塞底座与上盖板在工作过程中存在一定横向偏移,由式(1)可知,其横向输出力对播种下压力无直接影响,因此忽略空气弹簧变形过程分析中橡胶皮囊的横向形变,对下压力空气弹簧垂向变形过程中的有效工作半径进行分析,其变形过程如图4所示。

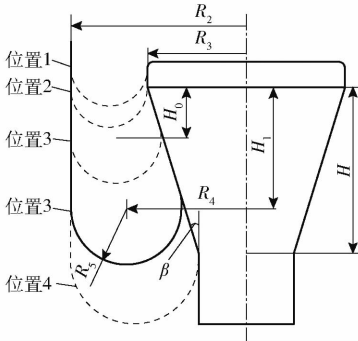


图4 下压力空气弹簧变形过程分析

Fig. 4 Deformation process analysis of downforce air spring

下压力空气弹簧变形过程按照压缩高度主要分为3个阶段(图4),当橡胶皮囊与活塞接触点高于位置1时,空气弹簧有效半径为空气弹簧橡胶皮囊内径,即

$$R_r = R_2 \quad (5)$$

当下压力空气弹簧工作位置处于位置1与位置2之间或超过位置4时,空气弹簧高度变化过程中有效工作面积不发生变化,此时

$$R_r = R_2 - R_3 \quad (6)$$

以上2个阶段下压力空气弹簧变形过程中有效面积不变,其垂向输出力与空气弹簧内部气压线性相关。

当空气弹簧工作高度处于位置2与位置4中间时,空气弹簧活塞锥面与橡胶皮囊接触,随着空气弹簧的压缩,空气弹簧有效面积减小,有助于降低空气弹簧垂向刚度。

当空气弹簧卷耳与中心距活塞上表面高度为 H_1 时,由几何关系得

$$R_r = R_2 - H_1 \tan \beta + R_3 \sec \beta \quad (7)$$

同时

$$R_2 = R_r + R_3 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)得

$$R_r = R_3 + \frac{R_2 - R_3}{1 + \cos \beta} - H_1 \tan \frac{\beta}{2} \quad (9)$$

由式(9)可知,在橡胶皮囊内径 R_2 不变的情况下,有效承载半径 R_r 与活塞半径 R_3 呈正相关,与活塞工作高度 H_1 及活塞锥角 β 呈负相关。

结合玉米免耕播种单体结构尺寸,播种单体在作业过程中最大仿形量为240 mm,根据下压力空气弹簧安装点位于四连杆长度1/3位置,确定活塞底座工作高度 H 为80 mm。玉米免耕播种机作业过程中所需最大下压力为2 500 N^[10],减去播种单体本身自重1 500 N,下压力调节装置为播种单体提供的最大额外下压力约为1 000 N。空气弹簧在四连杆处作用点为四连杆长度的1/3位置,使用式(1)计算确定空气弹簧最大垂向输出力为3 000 N。为了防止伸缩过程中橡胶皮囊卷入活塞与盖板之间,气囊内部最低气压应高于0.05 MPa^[27]。由式(3)可知,空气弹簧内部工作压力越大,其垂向刚度越大^[28],为降低空气弹簧垂向刚度,减少带地表起伏时播种下压力波动,结合空气弹簧气压确定其内部工作气压为0.05~0.6 MPa。

3 气动式播种下压力调节装置优化设计

为确定气动式播种下压力调节装置最优工作参数,在上述分析基础上,通过有限元仿真方法分析下压力空气弹簧橡胶皮囊和活塞结构参数对播种下压力稳定性的影响规律,确定下压力空气弹簧最优结构参数^[29-31]。

3.1 有限元模型构建

3.1.1 材料模型选择

在ABAQUS软件中建立空气弹簧有限元仿真模型时可根据受力及变形情况将其分成橡胶皮囊、腔内气体、上盖板及底部活塞4部分,所建立的空气弹簧模型如图5所示。选用Mooney-Rivlin模型来模拟橡胶材料非线性弹性, C_{10} 取0.517 8 MPa, C_{01} 取0.142 6 MPa^[32]。采用rebar单元对橡胶皮囊中的帘线层进行模拟,将帘线嵌入橡胶基体材料中,帘线材料弹性模量7 200 MPa,泊松比0.31^[32]。cavity模型用来模拟腔内气体。空气弹簧上盖板及底部活塞通常是由铝合金或者是尼龙材料制成,在分析过程中其变形量不是分析重点,因此将其视作刚体。

3.1.2 接触和边界定义

基于TIE工具将橡胶皮囊流体单元的重复节点

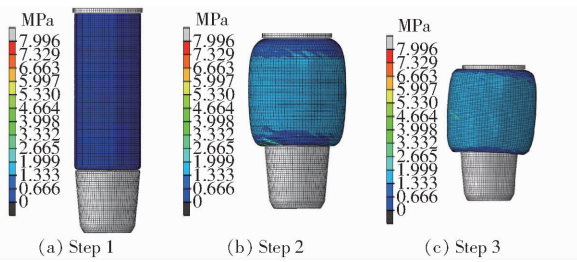


图5 下压力空气弹簧加载过程分析

Fig.5 Loading process analysis of downforce air spring

与盖板及活塞的刚性面参考点固定。通过橡胶皮囊与上盖板及下活塞端面形成密闭腔体,在空腔内进行充气。在此连接下橡胶皮囊上端面与上盖板连接,下端与活塞上表面连接,活塞底座带动橡胶皮囊绕其旋转中心平移。试验过程中,通过活塞底座平移模拟播种单体起伏。

3.1.3 网格划分与分析步定义

在模型建立时将橡胶皮囊简化为壳单元,通过S4R单元模拟橡胶皮囊壳单元,壳厚度与橡胶皮囊厚度相同,内嵌帘线层,采用扫掠方式生成网格,网格尺寸3 mm。对空气弹簧上盖板与活塞底座进行抽壳;通过S4R单元模拟上盖板与活塞离散刚体壳单元,采用扫掠方式生成网格,网格尺寸3 mm。

下压力空气弹簧加载分析过程为,如图5、6所示。第1步为充气过程,约束上盖板及活塞自由度,使空气弹簧橡胶皮囊处于最大伸长状态,对橡胶皮囊内流体腔进行充气至0.3 MPa。第2步为压缩过程,保持流体腔压力恒定为0.3 MPa,约束活塞自由度,上盖板向下移动压缩空气弹簧高度至200 mm,此时四连杆处于中心水平位置。第3步,约束上盖板自由度,断开内部流体腔气源,流体腔内部压力随流体腔体积变化,橡胶皮囊在活塞带动下绕回转中心向下移动40 mm,侧向移动8 mm,至活塞最低位置,空气弹簧处于最大拉伸状态。第4步,保证约束条件与第3步相同,橡胶皮囊在活塞带动下向上移动80 mm至最高位置,此时空气弹簧被压缩到最低工作高度,橡胶皮囊内部容积最小,内部气压最大。

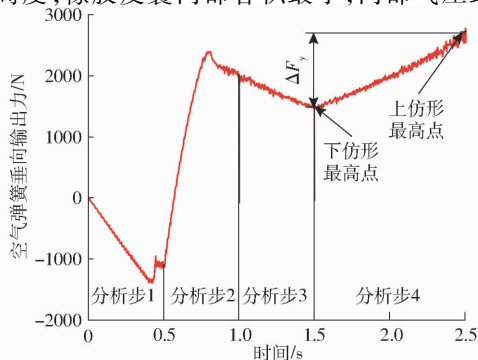


图6 仿真过程中空气弹簧垂向输出力变化

Fig.6 Vertical output force of air spring during simulation

3.2 优化指标

仿真试验中空气弹簧垂向输出力 F_y 变化如图6所示,气动式播种下压力调节装置优化目标是在满足下压力需求前提下,提高播种机在不平整地表作业时播种下压力稳定性。空气弹簧在不同结构参数下垂向刚度直接决定限深轮在同等高度地表起伏下播种下压力,通过降低空气弹簧垂向刚度,提高播种下压力稳定性。其工作行程内垂向刚度计算式为

$$k_{sy} = \frac{\Delta F_y}{\Delta y} = \frac{F_{y1} - F_{y0}}{\Delta y} \quad (10)$$

式中 k_{sy} ——空气弹簧垂向刚度, N/m

F_{y1} 、 F_{y0} ——不同位置下垂向输出力, N

Δy ——垂向高度变化量, m

在优化空气弹簧垂向刚度同时,空气弹簧变形范围内的垂向输出力也需满足播种下压力要求,其工作行程内垂向输出力均值计算式为

$$F_{my} = \frac{\sum_{i=1.5}^{i=2.5} F_y}{n} \quad (11)$$

式中 F_{my} ——垂向输出力均值, N

n ——采样点数量

3.3 试验设计

3.3.1 试验因素

根据播种下压力稳定性分析结果可知,决定播种下压力空气弹簧主要结构参数有空气弹簧变形后橡胶皮囊内径、活塞直径及活塞锥角。其中空气弹簧橡胶皮囊是由橡胶和帘线层硫化构成的复合材料,空气弹簧橡胶皮囊结构如图3b所示,影响空气弹簧承载特性的结构参数主要有帘线层间距 D_0 、帘线间距 D_1 、帘线角 α 、帘线层数量、帘线半径 R_1 及橡胶层皮囊厚度 δ 。其中帘线角为帘线与子午线之间夹角,是决定充气后橡胶皮囊内径主要结构参数,对空气弹簧垂向刚度影响最为显著^[33],为保证空气弹簧横向及垂向稳定性,帘线角通常为30°~60°。

空气弹簧活塞半径与承载力及内部气压不存在明确可推导关系^[34],为保证空气弹簧最大输出力满足播种下压力需求,结合空气弹簧工作气压和橡胶皮囊充气后膨胀比例1.1~1.7^[34-35],通过式(2)、(5)估算得下压力空气弹簧活塞头部半径为35~50 mm。当下压力空气弹簧活塞为倒圆台形($\beta > 0$)时,随着空气弹簧压缩,空气弹簧有效面积减小,有效面积变化率为负值,有利于减小空气弹簧刚度,降低播种单体下压力波动,因此选择活塞形状为倒圆台形。为保证活塞强度选定活塞锥角为0°~25°。

确定空气弹簧其他结构参数为:橡胶皮囊厚度2.5 mm、帘线间距 D_0 1 mm、帘线层数2层、帘线

层间距 D_1 1 mm、帘线半径 R_3 0.25 mm、工作高度 200 mm。

3.3.2 试验设计

确定影响播种下压力稳定性空气弹簧主要结构参数为帘线角 X_1 、活塞半径 X_2 、活塞锥角 X_3 , 试验因素编码如表 1 所示。试验方案与试验结果如表 2 所示。

表 1 试验因素与编码

Tab.1 Experimental factors and codes

编码	因素		
	$X_1/(^{\circ})$	X_2/mm	$X_3/(^{\circ})$
1.682	60.0	50.0	25.0
1	53.9	47.0	19.9
0	45.0	42.5	12.5
-1	36.1	38.0	5.1
-1.682	30.0	35.0	0

表 2 试验方案及试验结果

Tab.2 Test plan and experimental results

序号	因素			垂向刚度 $Y_1/$	垂向输出力
	$X_1/(^{\circ})$	X_2/mm	$X_3/(^{\circ})$	($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	均值 Y_2/N
1	36.1	38.0	5.1	15.2	1 879.4
2	53.9	38.0	5.1	14.5	1 480.1
3	36.1	47.0	5.1	24.8	2 990.9
4	53.9	47.0	5.1	22.3	2 276.1
5	36.1	38.0	19.9	8.6	1 667.5
6	53.9	38.0	19.9	5.7	1 120.3
7	36.1	47.0	19.9	17.8	2 780.0
8	53.9	47.0	19.9	12.4	1 761.9
9	30.0	42.5	12.5	21.3	2 775.8
10	60.0	42.5	12.5	12.0	1 552.5
11	45.0	35.0	12.5	6.7	1 171.7
12	45.0	50.0	12.5	19.3	2 611.7
13	45.0	42.5	0	23.9	2 220.2
14	45.0	42.5	25.0	6.7	1 630.9
15	45.0	42.5	12.5	11.9	1 812.9
16	45.0	42.5	12.5	12.4	1 836.9
17	45.0	42.5	12.5	10.9	1 828.9
18	45.0	42.5	12.5	12.2	1 798.4
19	45.0	42.5	12.5	11.6	1 818.1
20	45.0	42.5	12.5	13.8	1 783.2
21	45.0	42.5	12.5	11.2	1 779.3
22	45.0	42.5	12.5	13.1	1 863.0
23	45.0	42.5	12.5	10.4	1 840.4

3.4 仿真优化

3.4.1 回归分析与显著性检验

利用 Design-Expert 10.0.7 软件对试验结果进行二次回归分析,进行多元回归拟合。将不显著因素并入残差项后再次进行方差分析,得到垂向刚度 Y_1 与指标间回归方程为

$$Y_1 = 37.312 - 2.101X_1 + 0.895X_2 - 1.138X_3 + 0.021X_1^2 + 0.021X_3^2 \quad (12)$$

对上述回归方程进行失拟性检验,如表 3 所示,其中 $P>0.1$,不显著,证明试验指标和试验因素存在显著的二次关系。

通过对试验数据分析,下压力空气弹簧垂向刚度方差表如表 3 所示。由表 3 可知,试验模型极显著 ($P<0.01$)。主因素中帘线角、活塞半径及活塞锥角对垂向刚度的影响均极显著 ($P<0.01$);二次项中帘线角与活塞锥角对垂向刚度影响极显著 ($P<0.01$)。

表 3 垂向刚度方差分析

Tab.3 Variance analysis for vertical stiffness

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	619.48	9	68.83	45.85	<0.000 1 **
X_1	53.94	1	53.94	35.93	<0.000 1 **
X_2	217.42	1	217.42	144.84	<0.000 1 **
X_3	274.49	1	274.49	182.86	<0.000 1 **
X_1X_2	2.31	1	2.31	1.54	0.236 6
X_1X_3	3.25	1	3.25	2.17	0.164 9
X_2X_3	0.28	1	0.28	0.19	0.672 2
X_1^2	43.92	1	43.92	29.26	<0.000 1 **
X_2^2	2.20	1	2.20	1.47	0.247 6
X_3^2	22.32	1	22.32	14.87	0.002 0 **
残差	19.51	13	1.50		
失拟差	10.31	5	2.06	1.79	0.220 5
总和	639.00	22			

注: ** 表示极显著 ($P<0.01$),下同。

通过对试验数据分析,得到下压力空气弹簧垂向输出力均值方差表如表 4 所示。由表 4 可知,试验模型极显著 ($P<0.01$)。主因素中帘线角、活塞半径及活塞锥角对垂向输出力均值影响均极显著 ($P<0.01$);交互项中帘线角与活塞半径对垂向刚

表 4 垂向输出力均值方差分析

Tab.4 Variance analysis for mean vertical force

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	5.10×10^6	9	566 651.54	431.06	<0.000 1 **
X_1	1.64×10^6	1	1 642 887.78	1 249.77	<0.000 1 **
X_2	2.71×10^6	1	2 709 813.84	2 061.40	<0.000 1 **
X_3	3.83×10^5	1	383 279.86	291.57	<0.000 1 **
X_1X_2	77 303.12	1	77 303.12	58.81	<0.000 1 **
X_1X_3	25 447.68	1	25 447.68	19.36	0.000 7 **
X_2X_3	2 941.45	1	2 941.45	2.24	0.158 6
X_1^2	2.30×10^5	1	230 165.45	175.09	<0.000 1 **
X_2^2	9 175.23	1	9 175.23	6.98	0.020 3 *
X_3^2	20 590.18	1	20 590.18	15.66	0.001 6 **
残差	17 089.18	13	1 314.55		
失拟差	9 545.58	5	1 909.12	2.02	0.179 1
总和	5.12×10^6				

注: * 表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$),下同。

度影响极显著 ($P < 0.01$), 帘线角与活塞锥角对垂向刚度的影响极显著 ($P < 0.01$); 二次项中帘线角与活塞锥角影响极显著 ($P < 0.01$), 活塞半径影响显著 ($0.01 \leq P < 0.05$)。将不显著因素并入残差项后再次进行方差分析, 得到各因素与指标间回归方程为

$$Y_2 = -252.444 - 59.384X_1 + 108.394X_2 - 0.545X_3 - 2.471X_1X_2 - 0.851X_1X_3 + 1.513X_1^2 + 1.208X_2^2 + 0.652X_3^2 \quad (13)$$

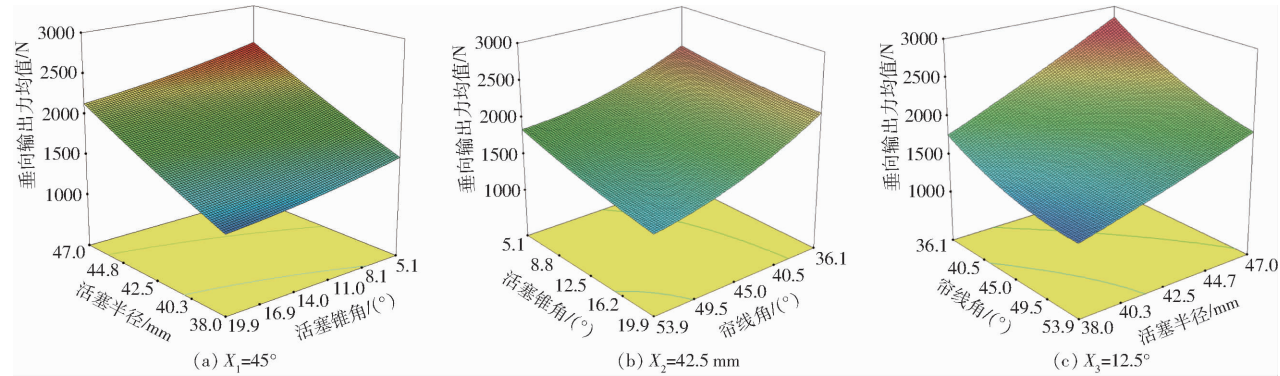


图 7 交互项因子对垂向输出力均值的影响

Fig.7 Effects of interaction factors on mean vertical force

由图 7b 可知, 当帘线角较小时随着活塞锥角增大, 空气弹簧垂向输出力均值明显增加, 随着帘线角增大, 活塞锥角对输出力影响减弱, 但仍为正向增益。原因为帘线角主要限制空气弹簧橡胶皮囊变形率, 帘线角越小, 空气弹簧橡胶皮囊横向变形率越大, 相同气压下空气弹簧有效承载半径越大, 空气弹簧垂向输出力变化越大。

由图 7c 可知, 当帘线角较大时随着活塞半径增大, 空气弹簧垂向输出力均值明显减小, 随着帘线角增大, 活塞半径对输出力影响减弱, 但仍为负向增益。其原因与活塞锥角相同, 同为帘线角对空气弹簧橡胶皮囊的横向变形率限制导致, 帘线角较大时, 橡胶皮囊变形率较小, 活塞锥角变化导致空气弹簧内部容积变化较大, 因此对空气弹簧垂向输出力影响较为明显。随着帘线角减小, 活塞锥角造成空气弹簧内部容积变化率减小, 活塞锥角影响减弱。

3.4.3 参数优化

为获得空气弹簧最佳结构参数, 利用 Design-Expert 10.0.7 优化模块对回归模型进行约束目标优化求解, 根据实际作业及相关理论选择优化约束条件、目标及约束函数。

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ Y_2 - 40Y_1 \geq 1\,500\text{ N} \\ \text{s. t.} \begin{cases} 30^\circ \leq X_1 \leq 60^\circ \\ 35\text{ mm} \leq X_2 \leq 50\text{ mm} \\ 0^\circ \leq X_3 \leq 25^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

对上述回归方程进行失拟性检验, 如表 4 所示, 其中 $P > 0.1$, 不显著, 证明试验指标和试验因素存在显著二次关系。

3.4.2 响应曲面分析

为分析各因素与试验指标之间的关系, 对试验数据进行分析处理, 得到帘线角、活塞半径与活塞锥角之间的交互因素对垂向输出力均值的响应曲面, 如图 7 所示。

对目标函数进行优化求解, 结合下压力空气弹簧安装需求, 得到的优化结果为: 空气弹簧帘线角 38° 、活塞半径 42 mm 、活塞锥角 23° , 此时, 垂向刚度为 10.3 N/mm , 平均垂向输出力 $2\,003.9\text{ N}$ 。根据优化后结果进行有限元仿真试验, 空气弹簧扭转过程中垂向刚度为 9.4 N/mm , 平均垂向输出力为 $1\,951.6\text{ N}$, 与优化结果基本一致。

4 田间试验

4.1 试验条件与方法

气动式播种下压力调节装置优化完成后, 进行样机加工与田间试验, 试验于辽宁省沈阳市沈北新区开展, 试验地前茬为春玉米平作, 试验前为避免地表秸秆对播种机开沟作业性能影响, 使用盘式搂草机对播种带进行清理。试验机具采用牵引式双行重型免耕播种机, 为验证气动式播种下压力调节装置作业效果, 试验前摘除播种单体的清秸防堵装置和覆土镇压装置, 并使用搂草机对播种带秸秆进行清理。试验现场如图 8a 所示, 播种机左侧单体采用螺旋弹簧式播种下压力调节装置, 播种机右侧单体安

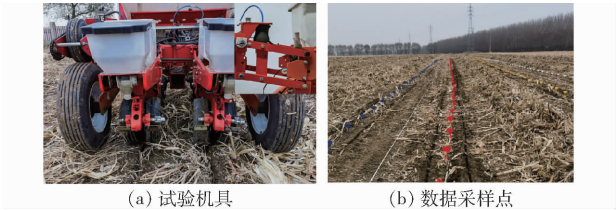


图 8 田间试验现场

Fig.8 Field experiments

装气动式播种下压力调节装置,结合试验区玉米播深 30 ~ 40 mm,设定开沟深度为 60 mm;根据当地播种机平均作业速度,分别进行播种机作业速度为 4、8、12 km/h 时开沟深度一致性对比试验。试验地如图 8b 所示,试验小区长度 70 m,宽度 2 m。试验小区中部 50 m 长度为试验采样区,两端分别设置 10 m 拖拉机加速区与减速区,每间隔 1 m 进行 1 次数据采样。作业开始前通过调节下压力空气弹簧气压,保持两侧播种单体初始播种下压力相同。

播种下压力稳定性直接影响开沟深度稳定性,因此参考农业行业标准 NY/T 1768—2009《免耕播种机质量评价技术规范》对播深进行评价,建立开沟深度稳定性评价指标。开沟深度稳定性评价指标主要包括开沟深度合格率、开沟深度标准差和开沟深度变异系数,计算式为

$$\eta_k = \frac{n_k}{N_k} \times 100\%$$

(15)

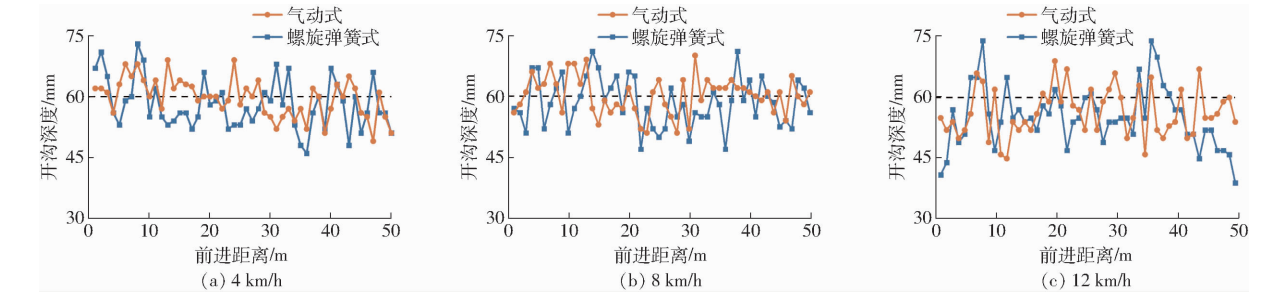


图 9 不同作业速度下开沟深度分布
Fig.9 Ditch depth distribution at different speeds

表 5 试验结果方差分析

Tab.5 Variance analysis for vertical stiffness

因素		开沟深度波动/mm	F	P
播种下压力	气动式	1.31 ± 5.52	4.04	0.045 *
调节方式	螺旋弹簧式	2.74 ± 6.75		
作业速度/ (km·h ⁻¹)	4	1.15 ± 5.54	10.97	<0.000 1 **
	8	0.63 ± 5.42		
	12	4.30 ± 6.91		

气动式相较于螺旋弹簧式播种下压力调节装置能够显著降低开沟深度波动(0.01 ≤ P < 0.05),作业速度对开沟深度有极显著影响(P < 0.01)。

当播种作业速度为 4 ~ 8 km/h 时,开沟深度分布相对集中,未出现明显波动;当播种作业速度自 8 km/h 增加至 12 km/h 时,开沟深度波动范围明显增大,开沟深度稳定性降低。但气动式播种下压力调节装置相较于螺旋弹簧被动式未出现开沟深度连续大偏差现象。

开沟深度合格率及变异系数能够反映播种下压力调节装置作用下破茬开沟装置开沟深度变化情况,不同播种下压力调节装置作用下开沟深度合格

$$S_{hk} = \sqrt{\frac{\sum (h_{ki} - \bar{h}_k)^2}{N_k}}$$

(16)

$$CV_{hk} = \frac{S_{hk}}{\bar{h}_k} \times 100\%$$

(17)

式中 η_k ——开沟深度合格率,%
 n_k ——开沟深度合格数
 N_k ——开沟深度测量点总数
 $\bar{h}_k$ ——开沟深度平均值,mm
 h_{ki} ——开沟深度测量值,mm
 S_{hk} ——开沟深度标准差,mm
 CV_{hk} ——开沟深度变异系数,%

4.2 试验结果

不同作业速度下气动式与螺旋弹簧式播种下压力调节装置作用下开沟深度分布如图 9 所示。

为明确试验因素对开沟深度的影响程度,对试验结果进行方差分析,结果如表 5 所示。结果表明

率和变异系数如图 10 所示。开沟深度变异系数方面,不同作业速度下气动式开沟深度变异系数均优

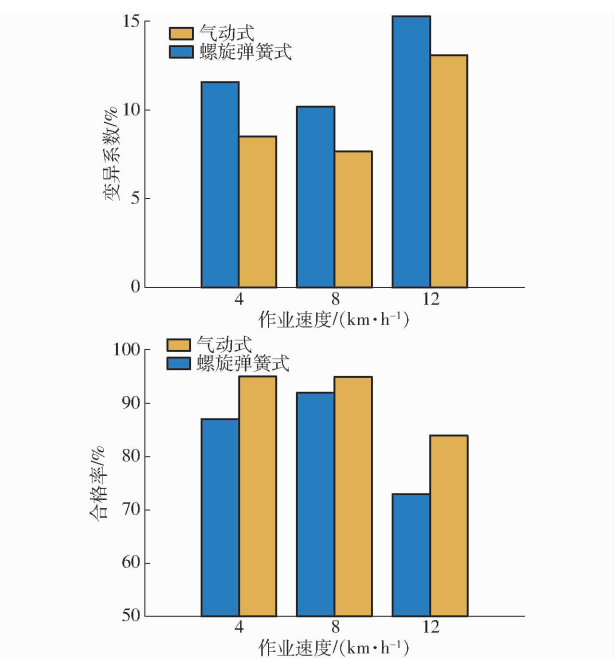


图 10 开沟深度稳定性试验结果
Fig.10 Results of stability test for ditch depth

于螺旋弹簧式,平均降低开沟深度变异系数 2.6%。当作业速度为 4、8、12 km/h 时,气动式开沟深度变异系数分别为 8.5%、7.7% 和 13.1%,螺旋弹簧式分别为 11.6%、10.2% 和 15.3%。

当作业速度为 4~8 km/h 时气动式开沟深度合格率保持稳定。当作业速度继续增加,气动式开沟深度合格率有明显降低趋势。当作业速度 4~12 km/h 时,螺旋弹簧式开沟深度合格率呈先增加后降低趋势。当作业速度为 4、8、12 km/h 时,气动式相较于螺旋弹簧式播种下压力调节装置开沟深度合格率分别提高 8、3、11 个百分点,高速作业条件下气动式对开沟深度提升效果更明显。不同作业速度下气动式播种下压力调节装置开沟深度合格率均高于 80%,满足国家标准要求,能够满足一定的高速作业需求。

5 结论

(1)明确了气动式播种下压力调节装置运动过程,分析了其主要工作部件下压力空气弹簧扭转变形规律,确定了影响播种下压力稳定性的空气弹簧主要结构参数为帘线角、活塞半径与活塞锥角。

(2)建立下压力空气弹簧有限元仿真模型,以提高地表起伏情况下的播种下压力稳定性为优化指标,对各因素进行二次旋转正交组合仿真试验,确定空气弹簧最优结构参数组合为:帘线角 38°、活塞半径 42 mm、活塞锥角 23°。

(3)田间试验结果表明,当作业速度为 4、8、12 km/h 时气动式相较于螺旋弹簧式播种下压力调节装置,开沟深度合格率分别提高 8、3、11 个百分点,开沟深度变异系数平均降低 2.58 个百分点,提高了播种作业质量。

参 考 文 献

[1] 许海涛,王勤俭,王友华,等. 播种深浅差异对玉米种子发芽出苗、幼苗特性及根系特征的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2020,48(2):10-17.
XU Haitao, WANG Qinjian, WANG Youhua, et al. Effects of sowing depth difference on maize seed germination and seedling emergence, seedling characteristics and root system trait[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,48(2):10-17. (in Chinese)

[2] 关小康,杨明达,白田田,等. 适宜深播提高地下滴灌夏玉米出苗率促进苗期生长[J]. 农业工程学报, 2016,32(13):75-80.
GUAN Xiaokang, YANG Mingda, BAI Tiantian, et al. Suitable deep sowing increasing emergence rate and promoting summer maize growth in seeding stage under subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(13):75-80. (in Chinese)

[3] 马树庆,王琪,陈凤涛,等. 春旱背景下春玉米苗情对产量的影响及减产评估模式[J]. 农业工程学报, 2015,31(增刊):171-179.
MA Shuqing, WANG Qi, CHEN Fengtao, et al. Impact of spring maize seeding growth on yield and assessment models of production cut under background of spring drought[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(Supp.):171-179. (in Chinese)

[4] 曹慧英,王丁波,史建国,等. 播种深度对夏玉米幼苗性状和根系特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015,26(8):2397-2404.
CAO Huiying, WANG Dingbo, SHI Jianguo, et al. Effects of sowing depth on seedling traits and root characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(8):2397-2404. (in Chinese)

[5] KYLE L, WILLIAM R, KEFYALEW D, et al. Effect of delayed emergence on corn grain yields[J]. Journal of Plant Nutrition, 2012,35(3):480-496.

[6] 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)

[7] 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)

[8] BADUA S A, SHARDA A, STRASSER R, et al. Ground speed and planter downforce influence on corn seed spacing and depth[J]. Precision Agriculture, 2021,22(4):1154-1170.

[9] 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)

[10] 周淑辉,王增辉,黄东岩. 基于 Flex 传感器的免耕播种机播深智能调节系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2020,38(5):555-562.

- ZHOU Shuhui, WANG Zenghui, HUANG Dongyan. No-till planter sowing intelligent depth regulation system based on Flex sensor[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2020,38(5):555–562. (in Chinese)
- [11] 高原源, 王秀, 杨硕, 等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019,50(7):19–29, 83. GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):19–29, 83. (in Chinese)
- [12] ZHOU Liming, MA Yihua, ZHOU Haiyan, 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.
- [13] JING Huirong, ZHANG Dongxing, WANG Yunxia, et al. Development and performance evaluation of an electro-hydraulic downforce control system for planter row unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,172:105073.
- [14] 白慧娟, 方宪法, 王德成, 等. 玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(9):61–72. BAI Huijuan, FANG Xianfa, WANG Decheng, et al. Design and test of control system for seeding depth and compaction of corn precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(9):61–72. (in Chinese)
- [15] 衣淑娟, 李怡凯, 李衣菲, 等. 玉米高速免耕播种机液压主动仿形机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(12):110–120,133. YI Shujuan, LI Yikai, LI Yifei, et al. Design and test of hydraulic active profiling mechanism for high-speed no-till corn planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(12):110–120, 133. (in Chinese)
- [16] 赵乃辰. 基于多传感器数据融合的播深检测与控制系统研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023. ZHAO Naichen. Research on seeding depth detection and control system based on multi-sensor data fusion[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [17] 李宝胜. 基于传感器信息融合的玉米播种深度控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2021. LI Baosheng. Research of control system for corn seeding depth based on multi sensor information fusion[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] 2BGZ—高速智能播种机[EB/OL]. <https://synm.nongji1688.com/sell/itemid-5469945.shtml>.
- [21] John Deere 1705 twin row planter[EB/OL]. <https://www.deere.com/en/planting-equipment>.
- [22] Pneumatic down pressure[EB/OL]. <https://www.kinze.com/planter-performance/down-force/pneumatic>.
- [23] 郑明军, 王海花, 王渊. 空气弹簧弹性特性理论分析与试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2009,29(3):43–46. ZHENG Mingjun, WANG Haihua, WANG Yuan. Theoretical analysis and experimental research on air spring's elastic characteristic[J]. Noise and Vibration Control, 2009,29(3):43–46. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 王家胜, 朱思洪. 带附加气室空气弹簧动刚度影响因素试验研究[J]. 振动与冲击, 2010,29(6):1–3. WANG Jiasheng, ZHU Sihong. Experimental study on influential factors on dynamic stiffness of air spring with auxiliary chamber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(6):1–3. (in Chinese)
- [26] 李滨, 陈无畏. 汽车膜式空气弹簧的分析与计算[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004,27(10):1191–1195. LI Bin, CHEN Wuwei. Analysis and calculation of diaphragm air spring of an automobile[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2004,27(10):1191–1195. (in Chinese)
- [27] 卢佳. 重型卡车空气悬架系统设计与优化研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2019. LU Jia. Design and optimization of heavy truck air suspension system[D]. Qingdao: Qingdao University, 2019. (in Chinese)
- [28] 成小霞, 李宝仁, 杨钢, 等. 囊式空气弹簧载荷建模与实验研究[J]. 振动与冲击, 2014,33(17):80–84. CHENG Xiaoxia, LI Baoren, YANG Gang, et al. Modeling and tests for load of a cystiform air spring[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(17):80–84. (in Chinese)
- [29] BEŠTER T, OMAN S, NAGODE M. Determining influential factors for an air spring fatigue life[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2019,42(1):284–294.
- [30] 王浩宇, 何锋, 赵晶, 等. 基于流固耦合的带附加气室空气弹簧的力学特性研究[J]. 橡胶工业, 2012,59(5):300–303. WANG Haoyu, HE Feng, ZHAO Jing, et al. Study on mechanical properties of air spring with auxiliary chamber based on

fluid-solid coupling[J]. China Rubber Ind. , 2012,59(5):300 – 303. (in Chinese)

[31] 袁春元,周孔亢,吴琳琪,等. 车用空气弹簧有限元分析方法[J]. 机械工程学报, 2009,45(6):262 – 266.
YUAN Chunyuan, ZHOU Kongkang, WU Linqi, et al. Finite element method to analyze vehicle air spring[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(6):262 – 266. (in Chinese)

[32] 徐艳民,郝伟. 基于 Abaqus 的悬架空气弹簧静态力学特性研究[J]. 橡胶工业, 2015,62(1):41 – 44.
XU Yanmin, HAO Wei. Analysis on static mechanical properties of air spring based on Abaqus[J]. China Rubber Ind. , 2015,62(1):41 – 44. (in Chinese)

[33] 屠德新,黄昌文,陈毛权,等. 基于 ABAQUS 的帘线参数对汽车空气弹簧垂向刚度影响的研究[J]. 汽车技术, 2011(2):10 – 13.
TU Dexin, HUANG Changwen, CHEN Maoquan, et al. Study on the influence of cord parameters on the vertical stiffness of air springs for vehicles based on ABAQUS[J]. Automobile Technology, 2011(2):10 – 13. (in Chinese)

[34] 杨泽彪. 车用膜式空气弹簧承载特性建模与试验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
YANG Zebiao. Research on modeling and testing of bearing characteristics of vehicular rolling lobe air spring[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)

[35] 李静,丁明慧,李立刚,等. 基于活塞形状的空气弹簧动特性分析与参数优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(2):355 – 363.
LI Jing, DING Minghui, LI Ligang, et al. Dynamic characteristics analysis and optimization of air spring based on the piston shape[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018,48(2): 355 – 363. (in Chinese)

(上接第 129 页)

[20] 洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[21] 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)

[22] 吴亚. 液压挖掘机履带底盘行驶性能虚拟样机仿真及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WU Ya. Virtual prototype simulation and experimental study on travelling performance of track chassis of hydraulic excavator [D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)

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

[24] 刘莫尘,梁文倩,肖化超,等. 履带式自走水力采藕机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 61 – 70.
LIU Mochen, LIANG Wenqian, XIAO Huachao, et al. Design and experiment of crawler-type self-propelled hydraulic lotus root harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.2): 61 – 70. (in Chinese)

[25] 粟生强. 丘陵山地果园小型除草机的结构设计及仿真分析[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.
SU Shengqiang. Structure design and simulation analysis of small weeding machine in hilly and mountainous orchards[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023. (in Chinese)

[26] 姜毅. 西瓜棚巡检机器人自动导航关键技术研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2024.
JIANG Yi. Research on key technology of automatic navigation for inspection robot in watermelon shed[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2024. (in Chinese)

[27] 钟银,薛梦琦,袁洪良. 智能农机 GNSS/INS 组合导航系统设计[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 40 – 46.
ZHONG Yin, XUE Mengqi, YUAN Hongliang. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(9): 40 – 46. (in Chinese)

[28] 倪博文. 水田作业机器人导航控制系统设计[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
NI Bowen. Design of navigation control system for paddy field operating robot[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)

[29] RAIKWAR S, FEHRMANN J, HERLITZIUS T. Navigation and control development for a four-wheel-steered mobile orchard robot using model-based design[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 1 – 17.