doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.025

玉米品字形高速精量播种机正压气流导槽式导种装置设计与试验

衣淑娟[1]　张淯朋[1]　戴智博[1]　孔泠童[1]　孙文胜[1]　许　磊[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, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对 2BDQ 系列玉米品字形播种机高速作业时(12 ~ 16 km/h)因气流裹挟种子进入双侧导种装置速度过快产生剧烈碰撞,使双侧种子交错均匀程度下降导致落种品字成形率低的问题,设计一种正压气流导槽式导种装置。阐述了导种装置结构与上下组合式导槽导种原理,建立玉米种子在导槽上引种、附种过程的力学模型,探究导种过程中种子约束状态与导槽结构参数的关系。采用 DEM - CFD 耦合仿真方法,分析玉米种子导种速度轨迹并比较气流场确定上导槽与下导槽宽度比例,通过单因素试验确定上导槽高度、下导槽宽度与输送气流正压取值范围。以单因素试验结果为试验因素水平值,以品字形合格指数、导种一致性变异系数为试验指标,利用 JPS - 16 型高速播种性能检测试验台进行三因素三水平 Box - Behnken 台架试验设计,得到导种装置最优参数组合并进行试验验证,并选用 4 种不同类型的玉米种子进行导种装置最优参数组合的适播试验。结果表明:最优参数组合为上导槽高度 354.491 mm、下导槽宽度 2.245 mm、输送气流正压 0.739 kPa,验证试验下该参数组合的品字形合格指数为 91.791%、导种一致性变异系数为 6.111%,与优化结果相符,在田间试验作业速度 12 ~ 16 km/h 工况中测得品字形合格指数不低于 85.1%。

关键词: 玉米; 品字形; 高速精量播种机; 正压; 导种装置; 导槽

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0261-14　　**OSID**:

Design and Experiment of Positive Pressure Airflow Guide Groove Seed Guiding Device for Maize Detal-row High-speed Precision Seeder

YI Shujuan[1]　ZHANG Yupeng[1]　DAI Zhibo[1]　KONG Lingtong[1]　SUN Wensheng[1]　XU Lei[2]

(1. *College of Engineering*, *Heilongjiang Bayi Agricultural University*, *Daqing* 163319, *China*
2. *Heilongjiang Beidahuang Modern Agricultural Service Group Co.*, *Ltd.*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In view of the current 2BDQ maize delta-row seeder high-speed operation (12 ~ 16 km/h) due to the airflow wrapped seeds into the bilateral seed guide device speed is too fast to produce a violent collision, so that the bilateral seed staggered uniformity was decreased, resulting in the problem of low forming rate of the falling seed, a positive pressure air guide groove type seed guide device was designed. The structure of the seed guiding device and the principle of the upper and lower combined seed guiding groove were expounded. The mechanical model of the introduction and attachment process of corn seeds on the guide groove was established, and the relationship between the seed constraint state and the structural parameters of the guide groove during the seed guiding process was explored. The DEM - CFD coupling simulation method was used to analyze the speed trajectory curve of corn seed introduction to determine the width ratio of the upper guide groove and the lower guide groove, and the range of the upper guide groove slotting height, the lower guide groove width and the positive pressure value of the conveying airflow was determined by single factor test. Taking the range of single factor test results as the level value of test factors, the qualified index of glyph and the coefficient of variation of seed introduction consistency as the test indexes, the Box - Behnken design bench test of three factors and three levels was carried out by using JPS - 16 high-speed seeding performance test bench, and the optimal parameter combination of seed introduction device was obtained and verified by test. Four kinds of seeds were

收稿日期: 2024 - 07 - 11　修回日期: 2024 - 10 - 10

基金项目: 黑龙江省重点研发计划重大项目(2022ZX05B02)和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

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

selected to carry out the suitable sowing test of the device. The results showed that the optimal parameter combination was the upper guide groove slotting height of 354.491 mm, the lower guide groove width of 2.245 mm, and the positive pressure value of the conveying air flow of 0.739 kPa. Under the verification test, the qualified index of the parameter combination was 91.791%, and the variation coefficient of the seed guiding consistency was 6.111%, which was consistent with the optimization results. In the field test, the qualified index of the glyph was not less than 85.1% at working speed of 12 ~ 16 km/h.

Key words: maize; delta-row; high-speed precision seeder; positive pressure; seed guide device; guide groove

0 引言

玉米品字形密植播种是在双行垄作的基础上实现玉米增产的一项先进种植模式,改进了传统单宽行垄作土地利用率较差等问题[1-5],密植增产的效果需要具备高速精量作业条件的播种机来实现。然而随着作业速度的提高,种子在导种环节碰撞加剧,播种精度低,因此需要高速精密的导种技术来保证种子以均匀有序状态运移至种床[6-11]。

现有导种装置可分为无约束、欠约束与全约束等多种形式[12]。无约束导种装置一般应用于自走式播种机,难以适应品字形密植播种高速作业形式[13-14]。在欠约束与全约束形式导种装置的研究中,瑞典 Vaderstad 公司研发的 Tempo 系列播种机配备了标准抛物线气力式导种长管,该装置利用正压气流实现高速投种,可满足 20 km/h 下的玉米精量播种作业[15];刘瑞等[16]设计一种正压气流辅助吹送导种装置,数值分析了输送装置的结构参数对种子运动的影响,探讨了种子出射速度与气流场的关系;韩建锋等[17]针对小麦设计了一种分引组合式双行宽条带导种装置,能够提升小麦宽条带播种均匀性;王龙宝等[18]设计了一种小麦气流辅助直线投种装置,采用气流辅助投种解决种子倒流与碰撞等问题;马成成等[19]研制了一种带式玉米高速导种装置,利用旋夹纳种机理将种子轨迹完全约束并有序运移至种床;廖宜涛等[20]针对西洋参密植播种机设计了行星轮点播式导种装置,该装置能够全程约束种子排种后位移情况。上述研究虽在一定程度上约束了种子导种运动轨迹,提高播种均匀性,但并未针对播种单元上成组导种装置内部种子速度一致性进行研究,现有导种装置在品字形高速作业时难以控制双侧种子均匀交错落种,影响落种时品字成形率。

针对上述问题,结合 2BDQ 系列玉米品字形高速精量播种机整机气压式结构,设计一种正压气流导槽式导种装置。运用力学分析、仿真模拟、试验研究等方法分析种子在装置内的运动过程,通过单因素仿真试验、多因素台架试验与田间试验来确定导种装置最优结构参数,以期为玉米品字形高速精量播种机配套导种装置设计提供参考。

1 播种机结构与原理

1.1 播种单体结构

2BDQ 系列玉米品字形高速精量播种机单体结构如图 1 所示,主要由风机、灭茬轮、限位轮、种箱、连杆机构、排种器、导种装置、开沟圆盘、机架、镇压轮、覆土轮等组成。

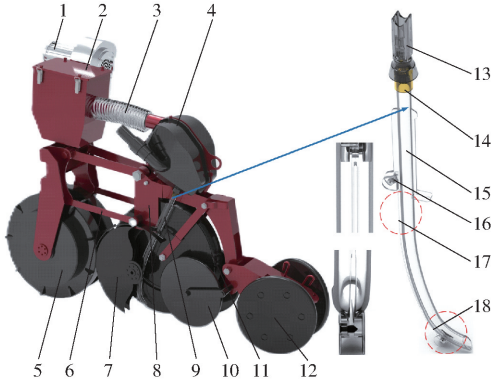


图 1 播种单体与单侧导种装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of seeding monomer and unilateral seed guide device

1. 风机 2. 种箱 3. 供种软管 4. 排种器 5. 灭茬轮 6. 连杆机构 7. 开沟圆盘 8. 机架 9. 导种装置 10. 镇压轮 11. 限位轮 12. 覆土轮 13. 排种过渡管 14. 调压连接管 15. 导种管体 16. 限位孔 17. 上导槽 18. 下导槽

播种机排种与导种系统主要由双盘气压式排种器、排种过渡管、调压连接管、导种管体组成。其中,在导种管体上设有上下组合式导槽结构进行辅助导种。导种管体与排种过渡管材料为 ABS 塑料,调压连接管根据气流特性由软质橡胶材料制成;排种过渡管、调压连接管、导种管体三者结构由环形卡扣圆滑连接形成三管一体通道。单侧导种装置如图 1 所示,双侧导种装置以排种器内种子出射正方向为装配轴线对称装配在排种器卸压轮对应型孔处。播种机技术参数如表 1 所示。

2BDQ 系列玉米品字形高速精量播种机符合黑龙江玉米宽窄行种植区农艺要求[21-23],垄距长度集中在 600 mm 左右,品字交错的两小列种子行间的小株距为 100 mm,单列株距为 200 mm,如图 2 所示。

表 1　播种机技术参数

Tab. 1　Technical parameters of seeder

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	12 000×7 000×4 000
整机质量/kg	4 600
配套动力/kW	≥140
作业行数	6～12
适应垄距/mm	750
作业速度/(km·h^{-1})	12～16

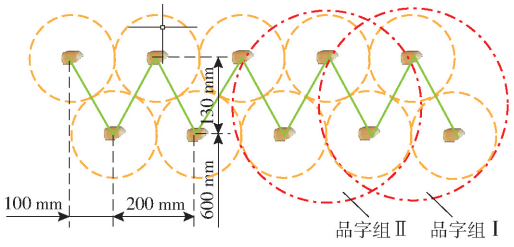


图 2　品字形播种模式

Fig. 2　Delta-row seeding mode

1.2　导种装置工作原理

导种装置工作原理如图 3 所示，装置划分为 4 个区域，根据双盘气压式排种器对称腔室及偏移交错型孔式排种盘的设计，作业时玉米种子靠自身重力以及气流作用从排种器进种管两个腔室，种子滞留在待充种区并保持在一定充种高度。在正压气流及排种盘作用下种子处于扰动状态。种子被气流压附到型孔后，随排种盘回转经过清种区，通过递进式刮种刀使型孔上保留单粒种子。当种子转至卸压点，卸压轮将卸压点对应的种盘型孔内侧堵塞，型孔内外压差消失，两侧玉米种子在卸压点呈交错态相继脱离型孔，接种区Ⅰ在重力与正压气流的作用下以导种装置轴线为正方向进入排种过渡管，种子脱离真空区由调压连接管控制气压调控至合适速度，垂直于装置方向将种子稳定送至导种管体，进入引种区Ⅱ。当气种两相流经上导槽结构时，管体内外形成压差，种子因而引附在上导槽上，在重力、输送气流和引附气流的三重作用下种子附着在导槽侧壁做匀减速运动，上、下导槽对种子的运移进行有效约束，形成附种区Ⅲ；由抛物线型导种曲线设计的管体末端约束种子投出的方向并降低种子着床时与地面的相对速度，投种时种子以碾合侧压种轮切线与土壤夹角中线为正方向，落种瞬间镇压轮迅速将种子压入种沟，形成投种区Ⅳ。4 个区域约束玉米种子排种后流向，保证双侧导种装置内种子速度一致。

2　结构设计与分析

为了确保导种装置能够适应不同类型玉米种子特征尺寸进行作业，本研究选取密植模式广泛种植

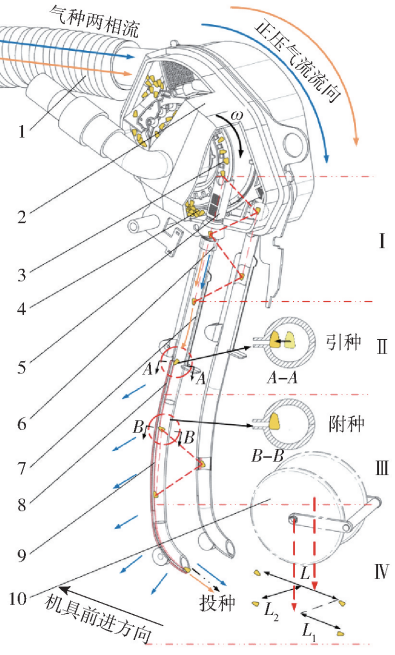


图 3　工作原理图

Fig. 3　Working principle diagram

1. 供种软管　2. 排种器　3. 排种盘　4. 种子　5. 排种过渡管　6. 调压连接管　7. 导种管体　8. 上导槽　9. 下导槽　10. 镇压轮　Ⅰ. 接种区　Ⅱ. 引种区　Ⅲ. 附种区　Ⅳ. 投种区

的 4 类形状尺寸不同的玉米品种，以其特征尺寸作为导种装置结构尺寸设计依据，如表 2 所示，所选种子经分级清选，结果为多次测量取均值。

表 2　玉米种子特征尺寸

Tab. 2　Maize seed characteristic size　　mm

品种	长度 l_p	宽度 w_p	厚度 t_p
迪卡 C2235(大圆形)	10.24±0.59	9.74±0.54	7.24±0.61
和育 187(大扁形)	12.10±0.41	9.22±0.46	4.73±0.53
法尔利 143(小圆形)	8.03±0.41	7.12±0.46	6.34±0.43
奥洋红 A9(小扁形)	9.94±0.71	7.03±0.49	4.06±0.37

2.1　导种管体结构设计

导种装置设计标准圆截面小口径的管型以约束种子在导种环节种子运动，选取直线形与抛物线形双段式管体，其轮廓主要由竖直段和曲线段组成。管体关键结构参数主要有管体内径 D_1、管体竖直段长度 l_2 与管体整体长度 l_1，如图 4 所示。

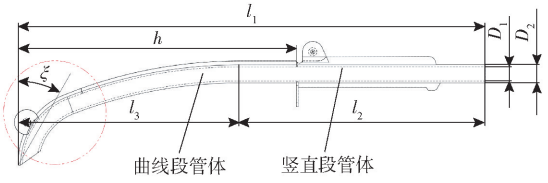


图 4　导种管体结构图

Fig. 4　Structure diagram of guide tube

在高速作业(12～16 km/h)与品字形密植株距 20 mm 的条件下，结合导种管体内单位时间输送的种子质量与不同品种玉米种子特征尺寸，导种管体

内径计算公式为

$$D_1=\sqrt{\frac{4\dot{M}}{\pi\varepsilon\rho P_D^2}}\geqslant 1.4d \tag{1}$$

其中

$$d=\frac{l_p w_p}{l_p+w_p}$$

式中 $\dot{M}$——玉米种子单位时间输送质量,g/s

ε——气种两相流质量比,取 0.3 ~ 0.7

P_D——输送气流正压,kPa

d——玉米种子当量直径,mm

ρ——空气密度,kg/m^3

播种机输送气流正压在 0.5 kPa 以上可实现供种、充种与种子气压输送,结合式(1),可确定导种管体内径应大于等于 17 mm。为了降低玉米种子进入导种装置时发生无序碰撞的频率,确保各个品种的玉米种子在导种装置管内不会出现卡顿现象,确定 D_1 为 19 mm。根据导种装置壁厚适应度,确定导种管体外径 D_2 为 22 mm。当忽略导槽气压损失,输送气流在导种装置内流动时会受到阻力,结合伯努利方程与达西-韦斯巴赫方程可得

$$P_D=f\frac{l_1\rho v_D^2}{2D_1} \tag{2}$$

式中 f——达西摩擦因子

v_D——输送气流速度,m/s

由式(2)可知,输送气流在导种管体中受到的阻力与管体长度、输送气流在管体的平均速度成正比,与管体直径成反比。通过达西-韦斯巴赫方程对压降的求解可知,此时导种管体长度 l_1 取适宜值时,有利于减小输送气流受到的阻力,保证合适导种速度。根据播种机高度,排种器卸种型孔离地高为 700 mm,导种装置在与排种器装配后投种口离地间隙 h_t 应保持在 150 mm[16],导种管体总长度 l_1 设计为 550 mm,综合考虑设计导种装置各部分长度,取 l_2 为 300 mm,曲线段管体长度 l_3 为 250 mm。因曲线段管体为抛物线设计,ξ 为种子投种出射角,投种镇压过程如图 5 所示。

为防止种子高速投种落入种沟后与土壤产生过度弹跳或直接与镇压轮发生碰撞影响播种效果,需取合适的出射角 ξ 来保证导种装置投出的种子能够直接投射在合适位置,受镇压轮碾合镇压。

2.2 上下组合式导槽结构设计

玉米种子在装置内碰撞会使双侧种子下落速度不一致,为了使管内碰撞可控,在导种管体侧壁上设置上下组合式导槽结构约束种子导种,设计导槽形状为矩形截面。根据导种管体双段式结构,上导槽与下导槽分别置于管体竖直段与曲线段上,导槽间连接处进行圆滑处理防止损坏种子。

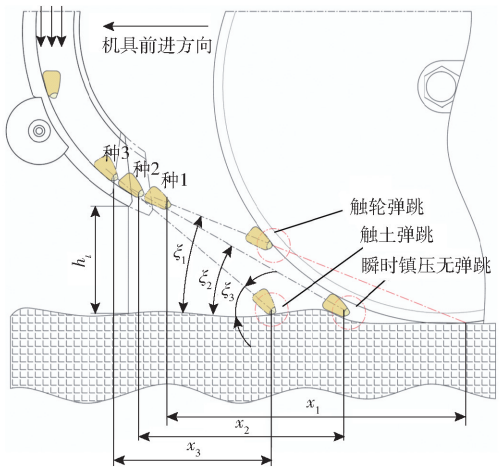


图 5 投种镇压示意图

Fig. 5 Schematic of seed suppression

2.2.1 导槽引种阶段分析

引种过程中,玉米种子经调压连接管离开接种区到达脱离点,种子因导槽内外产生压差而向槽壁做抛物运动,并与导槽的壁面发生碰撞和短时的弹跳,最终完成引种。以导种装置上导槽开槽口最内端作为原点,建立直角坐标系 XOY,如图 6 所示,各点坐标为 $O(0,0)$、$A(x_1,y_1)$、$B(x_2,y_2)$。点 A、B 坐标满足关系式

$$\begin{cases}2a_q x_1=\alpha_1\\2a_q x_2=\alpha_2\\y_1=a_q x_1^2\\y_2=a_q x_2^2\\y_2-y_1=H_{AB}\end{cases} \tag{3}$$

式中 a_q——引种抛物线二次项系数

α_1——终止引种角,(°)

α_2——起始引种角,(°)

x_1——引种曲线最低点横坐标,mm

y_1——引种曲线最低点纵坐标,mm

x_2——引种曲线最高点横坐标,mm

y_2——引种曲线最高点纵坐标,mm

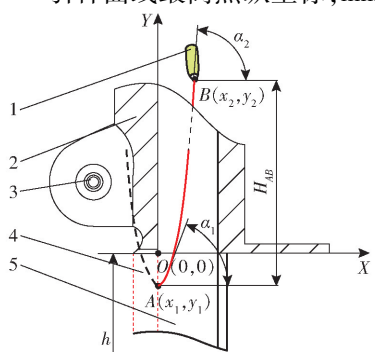


图 6 引种抛物线示意图

Fig. 6 Parabolic schematic of introduction

1. 玉米种子 2. 管体 3. 限位孔 4. 上导槽 5. 管腔

H_{AB}——引种高度，mm

根据图 6 和式(3)可知，引种曲线形式可由起始引种角 α_2、终止引种角 α_1 和引种高度 H_{AB} 确定，此三值互为正相关且与上导槽开槽高度 h 负相关。

玉米种子完全引种距离 H 越大，投种时双侧种子下落速度不一致导致双侧导种时差发生改变，品字成形率降低。由图 7 可知，当 α_1 值越小，引种长度 H_{AB} 相对较短，能够快速引种而减少机具振动产生引种前轨迹不可控率，此时引种曲线切线斜率较低，玉米种子与管壁碰撞弹跳角度大导致完全引种距离较长，形成高位引种状态；同理 α_1 值越大，会形成低位引种状态，种子碰撞角度小、完全引种距离较小，但引种长度 H_{AB} 大会使种子引种约束时间长而轨迹不可控，导致引种前碰撞，增大完全引种距离。由于 α_2 在高速导种作业中可设为固定值，h 与 α_2、H_{AB} 负相关且根据管体设计应满足

$$2l_3 \geqslant h \geqslant 1.2l_3 \tag{4}$$

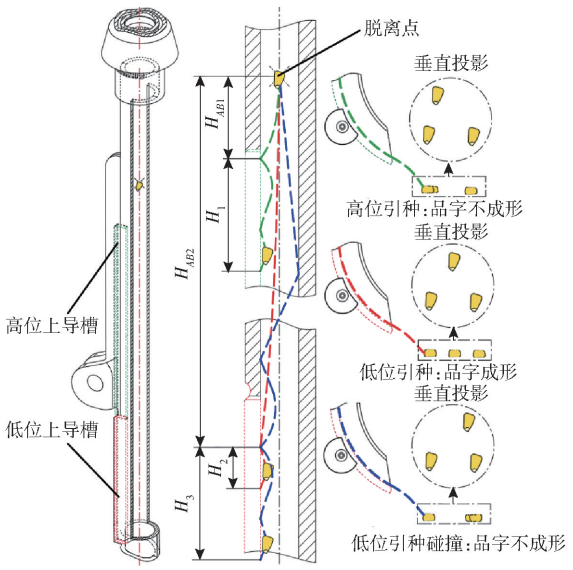


图 7　不同上导槽开槽高度引种对比图

Fig. 7　Comparison diagram of different slot height introduction

2.2.2　导槽附种阶段分析

为了考察导槽结构参数对导种性能的影响，对种子附种阶段的流场与运动过程进行力学分析，并探究气流、导槽与种子受力之间的关系。

(1)种子附种状态流场力学分析

玉米种子在稳定的流场环境下实现附种状态时[24]，以单位玉米种子为研究对象，分析种子在流场中受到的气流作用力，确定种子受力的影响因素，种子在流场中的受力情况如图 8 所示。

当玉米种子在附种状态前与导槽距离为 l，以种子质心建立 XOY 轴。由于导种装置内部为不可压缩平面，结合流体力学相关研究可知，当流场湍流强度为 I，导槽附近流场的流场复势 $W(z)$ 与该复势的

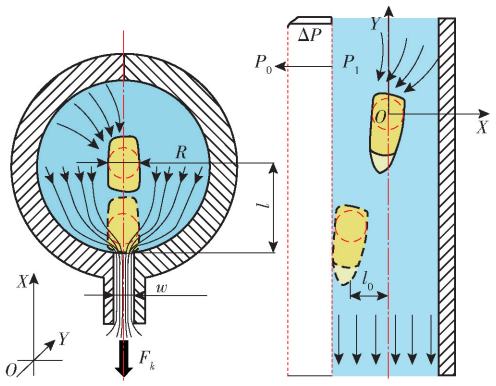


图 8　种子在流场中受力示意图

Fig. 8　Force diagram of seeds in flow field

流函数 ψ、势函数 φ 分别为

$$\begin{cases} W = Iz^{-\frac{1}{2}} \\ \psi = I(z-l)^{-\frac{1}{2}} \\ \varphi = I[-(z+l)]^{-\frac{1}{2}} \end{cases} \tag{5}$$

导槽会使管体内产生一定的压差 ΔP，只取玉米种子竖立附种姿态(图 8)，忽略其不规则结构，以种子质心为圆心绘制虚拟圆，半径为 R，结合伯努利原理并对复势求导解算复速度为

$$\begin{cases} \Delta P = \dfrac{1}{2}\rho v_z^2 \\ v_z^2 = \dfrac{W(z)}{z}\dfrac{\overline{W(z)}}{z} = \\ \qquad \dfrac{S}{4}\left[\dfrac{-6l}{(l_0^2+l^2)^2} + \dfrac{8l^3}{(l_0^2+l^2)^3} + 2(l_0^2+l^2)^{-\frac{3}{2}}\right] \\ S = \dfrac{2KV}{\pi R_d} \\ V = l_p w\sqrt{\dfrac{2\Delta P}{\rho C_d}} \end{cases} \tag{6}$$

式中　v_z——复速度，m/s

$\overline{W(z)}$——$W(z)$ 共轭函数

S——玉米种子有效吸附面积，m^2

l_0——玉米种子与导槽横向偏移距离，mm

K——常数，随 V 增大而减小

V——空气流量，m^3/s

R_d——玉米种子质心圆导槽处投影半径，mm

l_p——玉米种子长度，mm

w——导槽宽度，mm

C_d——曳力系数

导槽吸附力 F_k 为

$$F_k = \iint_S \left(\frac{1}{2}v_z^2\right)S = \int_0^R \frac{1}{2}\rho\frac{S^2}{2}\cdot \left[\frac{-3l}{(R^2+l^2)^2} + \frac{4l^3}{(R^2+l^2)^3} + (R^2+l^2)^{-\frac{3}{2}}\right]\mathrm{d}R\mathrm{d}V \tag{7}$$

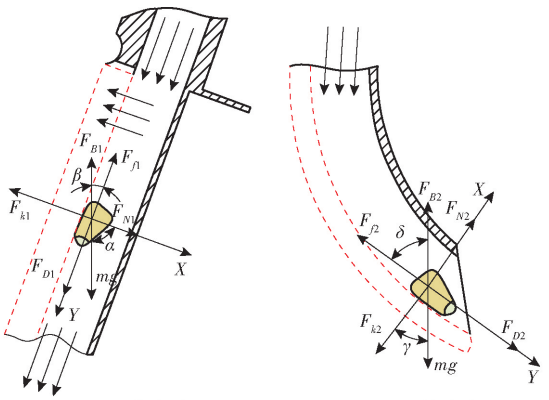
对玉米种子质心圆受力在导槽壁面上积分，结合式(7)可得导槽吸附力 F_k 为

$$F_k = K^2 \frac{l_p w \Delta P}{2C_d}\left[\frac{3l}{R^2+l^2} - \frac{2l^3}{(R^2+l^2)^2} - \frac{1}{\sqrt{R^2+l^2}} + \frac{1}{l}\right] \tag{8}$$

玉米种子的附种状态受导槽吸附力影响，由式(8)可得，种子在流场中受到导槽吸附力 F_k 与导槽宽度 w、导槽内外压差 ΔP、种子尺寸有关。在此研究基础上对直、曲两个阶段玉米种子附种进行受力分析，进一步探究导槽吸附力 F_k 与导槽宽度 w 之间的关系。

(2)上下导槽附种阶段力学分析

为了探究导槽吸附力 F_k 对附种稳定性的影响，以种子质心为坐标原点，垂直导槽方向为 X 轴方向，种子运动方向为 Y 轴方向分别建立上导槽直角坐标系 1 与下导槽直角坐标系 2，如图 9 所示。



(a) 上导槽附种　　(b) 下导槽附种

图 9　不同导槽种子附种受力分析

Fig. 9　Force analysis diagrams of seed attachment in upper and lower guide grooves

结合流场分析，不同导槽种子受力方程为

$$\begin{cases} \sum F_{X1} = F_{N1} - F_{B1}\cos\alpha + mg\cos\alpha - F_{k1} \\ \sum F_{Y1} = F_{D1} + mg\cos\beta - F_{f1} - F_{B1}\cos\beta \\ \sum F_{X2} = F_{N2} + F_{B2}\cos\gamma - mg\cos\gamma - F_{k2} \\ \sum F_{Y2} = F_{D2} + mg\cos\delta - F_{f2} - F_{B2}\cos\delta \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} F_D = \dfrac{1}{2}AC_d\rho v_D^2 \\ v_D^2 = \dfrac{2P_D}{\rho} \\ F_f = fF_N \\ a = \dfrac{F_Y}{m} \end{cases} \tag{10}$$

式中　F_X——种子垂直于运动方向的合力，N

α——种子重力方向与 Y 轴负方向夹角，(°)

β——种子浮力方向与 Y 轴负方向夹角，(°)

γ——种子重力方向与 X 轴负方向夹角，(°)

F_Y——种子沿运动方向的合力，N

F_N——管壁支持力，N

F_B——管内竖直向上的浮力，N

mg——玉米种子自身重力，N

F_D——输送气流作用产生的曳力，N

F_f——管壁摩擦力，N

A——种子迎风面的受力面积，m^2

f——导种装置摩擦因数

a——玉米种子管内加速度，m/s^2

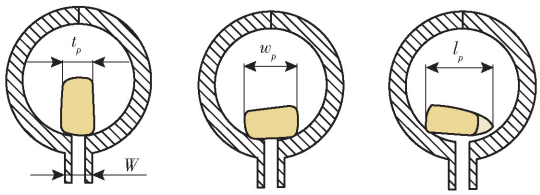
由式(9)、(10)可得两阶段种子加速度 a_1、a_2 为

$$\begin{cases} a_1 = \dfrac{AC_dP_D}{m} + g\cos\beta - f\dfrac{F_{N1}}{m} - \dfrac{F_{B1}\cos\beta}{m} \\ a_2 = \dfrac{AC_dP_D}{m} + g\cos\delta - f\dfrac{F_{N2}}{m} - \dfrac{F_{B2}\cos\delta}{m} \end{cases} \tag{11}$$

式中　δ——种子浮力方向与 Y 轴负方向夹角，(°)

式(11)中，附种过程中种子的加速度主要与输送气流正压 P_D、支持力 F_N、种子运动方向与垂线的夹角有关。为保证玉米种子在装置内做匀减速运动，两阶段附种过程玉米种子加速度需保持一致，因在正方向下导槽附种支持力大于上导槽附种，且导槽吸附力与支持力正方向之和为零，可得 F_{k1} 小于等于 F_{k2}，故下导槽宽度 w_2 的设置需大于等于上导槽宽度 w_1。

玉米种子普遍以图 10 所示 3 种姿态进行导种作业。因此要考虑种子长度、宽度、厚度与导槽接触情况。



(a) 竖立姿态　(b) 竖躺姿态　(c) 横躺姿态

图 10　3 种附种姿态示意图

Fig. 10　Three kinds of attached species posture diagram

玉米种子粒径、质量大，在风压一定的条件下导槽宽度不应过小，而过大的导槽宽度会导致种子在吸附滑动过程中造成堵塞与种子损伤。结合前文玉米三轴尺寸，为了防止导槽吸附力过大导致卡种，下导槽宽度 w_2 可在(0.3 ~ 0.85)t_p 范围内取值[25-27]，并在后续试验中确定 w_1 与 w_2 的比例，设计上下组合式导槽整体结构尺寸。

3　仿真

为了探究不同结构参数的正压气流导槽式导种装置的导种效果，应用 DEM - CFD 耦合仿真分析不同结构参数下导种装置内颗粒在流场中的运动情况，探究其对导种作业的影响[28]。

3.1　仿真设置

仿真试验材料选用“和育 187”玉米品种进行玉米种子颗粒建模，并进行填充，颗粒模型如图 11a 所示。

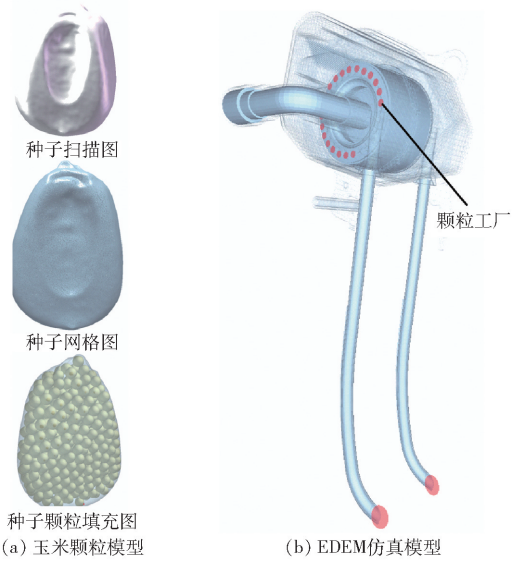


图 11　仿真模型

Fig. 11　Simulation models

本研究对排种、导种装置整体进行模型建立，并导入 SpaceClaim 简化排种过渡管、调压连接管与连接孔等结构为管体，保留导种装置管体接触种子与气流经过部分，排种器简化进出口及腔体不规则区域，保留型孔、充气室、出气室 3 部分，并抽取流体域模型；创建 NS 群组设置 inlet 与 outlet，为使输送气压值对导种作业的影响明确化，将排种器与导种装置流体域设置为两组互不干涉的独立物理模型，并在导种装置进种口设置第 2 inlet 面，形成组合式流体域。

将流体域文件导入 Fluent – Meshing 中进行网格划分，面网格最小为 0.1 mm、最大为 5 mm，并填充体网格，将划分的网格文件保存为. msh 格式供 Fluent 与 EDEM 耦合使用。EDEM 仿真模型如图 11b 所示，为简化排种过程，以种子在型孔吸附区域位置建立颗粒工厂，固定生成一颗种子，使种子快速过渡至导种环节。耦合采用计算体积分数的 Eulerian 离散相模型（Dense discrete phase model，DDPM），将边界条件定义为压力入口与压力出口。Fluent 仿真模型如图 12 所示，图示中蓝色虚线表示排种器压力入口，红色虚线表示排种器压力出口。耦合仿真设定排种盘转速为 40 r/min，流场入口压力为 3.5 kPa，排种过渡管出口压力与导种入口压力均为 0.75 kPa，设置 Fluent 时间步长为 EDEM 整数倍，EDEM 时间步长为 8×10^{-7} s、Fluent 时间步长为 1×10^{-4} s，试验总仿真时长为 2 s。

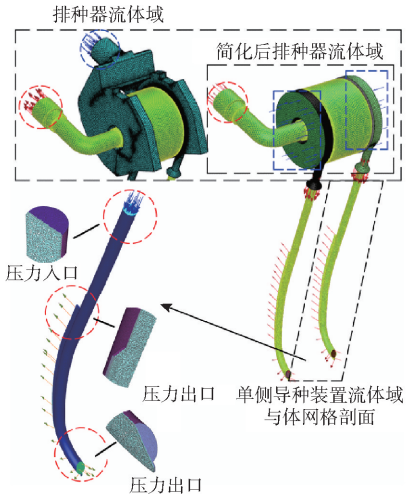


图 12　Fluent 仿真模型

Fig. 12　Fluent simulation model

导种装置与排种装置的加工材料均为 ABS 塑料，仿真材料物理特性参数与相关力学特性参数如表 3、4 所示。

表 3　仿真模型材料参数

Tab. 3　Material parameters of simulate model

参数	材料	
	玉米种子	导种、排种装置
泊松比	0.4	0.5
剪切模量/Pa	1.37×10^{8}	1.77×10^{8}
密度/(kg·m^{-3})	1 197	1 180
弹性模量/MPa	273.9	316.0

表 4　仿真模型材料接触参数

Tab. 4　Material contact parameters of simulate model

材料	参数	数值
玉米种子–玉米种子	碰撞恢复系数	0.182
	静摩擦因数	0.2
	滚动摩擦因数	0.078 2
玉米种子–导种、排种装置	碰撞恢复系数	0.621
	静摩擦因数	0.482
	滚动摩擦因数	0.093 1

本研究以一行相邻的两颗种子及两颗种子间对行种子构成的三角形状为一组品字形，如图 13 所示。记种床带网格单元播种均匀段相邻连续的总组数为 N，合格组单行相邻的两颗种子对行应仅有一粒种子，且需满足条件

$$\begin{cases} x\in(0.8\sim1.2)L \\ x_s\in(0.2\sim0.8)x \end{cases} \tag{12}$$

式中　x——单行实际株距，m

L——单行理论株距，m

x_s——双行相邻种子实际株距，m

品字形合格指数定义为

$$Z_1 = \frac{n_1}{n} \times 100\% \tag{13}$$

式中 Z_1——品字形合格指数,%

n_1——合格品字形组数

n——随机相邻总品字形组数

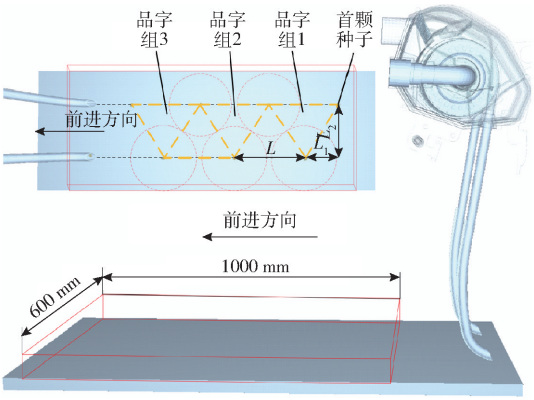


图 13 品字形合格指数定义

Fig. 13 Definition of delta-row qualification index

导种一致性变异系数试验方式如图 14 所示,以管内每相邻两颗玉米种子为一组,试验过程中统计导种装置投种口一定时间范围内经过的每组种子时差,导种一致性变异系数计算公式为

$$Z = \frac{S_t}{J_t} \times 100\% \tag{14}$$

式中 Z——导种一致性变异系数,%

S_t——导种装置相邻两颗种子时差标准差,s

J_t——导种装置相邻两颗种子时差平均值,s

3.2 仿真过程与结果分析

以下导槽宽度 w_2 范围中间值 2.5 mm 为宽度基准,固定上导槽开槽高度为 350 mm、输送气流正压为 0.75 kPa,设置上、下导槽宽度比为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 进行导种效果仿真试验。玉米种子在导种装置内速度轨迹如图 15 所示。由图可知,不同导

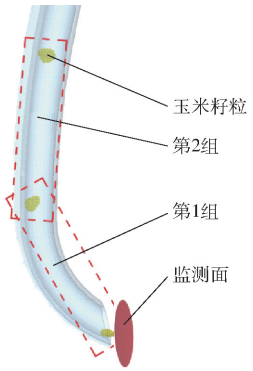
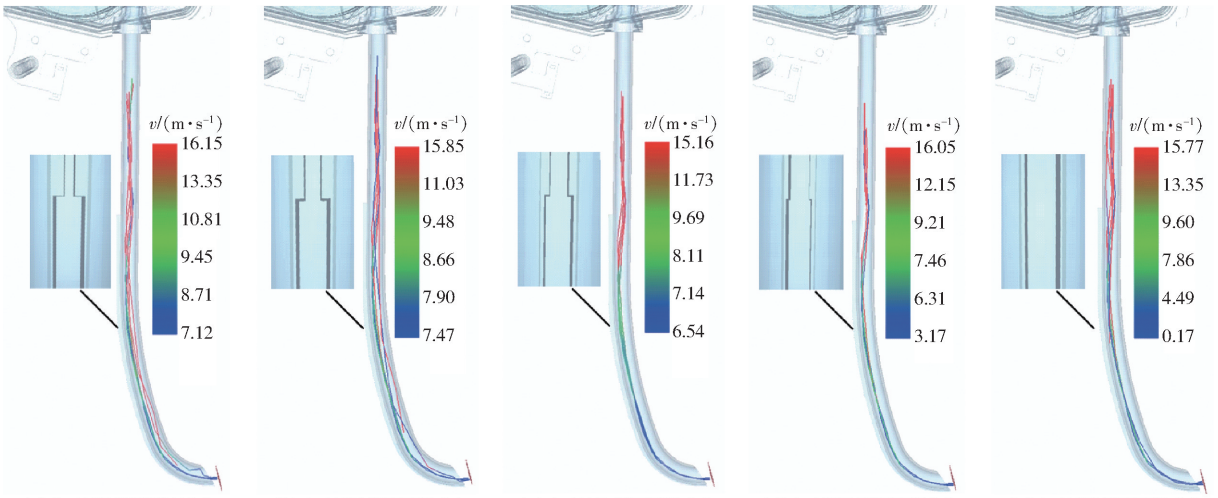


图 14 导种一致性变异系数定义

Fig. 14 Definition of variation coefficient of introduction consistency

槽宽度比的导种装置对玉米种子均具有导流和控速作用。其中,图 15a、15b、15c 玉米种子导种速度较为稳定,但图 15a、15b 由于上导槽宽度较小导致导槽处压力过小而未能完全附种的现象,无法对种子进行有效约束;图 15c、15d、15e 玉米种子轨迹较为稳定,但图 15d、15e 种子速度差值较大,图 15e 轨迹中出现种子滞塞现象,导致管内种间碰撞。由上述分析可知上、下导槽宽度比为 0.6 的导种装置作业时玉米种子轨迹与气流场分布相比其他比例结构较为稳定,具有较好的种子分布与速度。

在与上述仿真试验相同的条件下,以品字形合格指数与导种一致性变异系数为指标进行导槽宽度比例单因素试验,试验结果如图 16a 所示,导种一致性变异系数随导槽宽度比例增加呈先减小后增大的趋势,品字形合格指数变化对比导种一致性变异系数相反,结果与导种效果仿真试验结果一致。在上、下导槽宽度比为 0.6 的结构下,进行以上导槽高度、下导槽宽度、输送气流正压为试验因素的单因素试验。试验结果如图 16b ~ 16d 所示,在上导槽高度

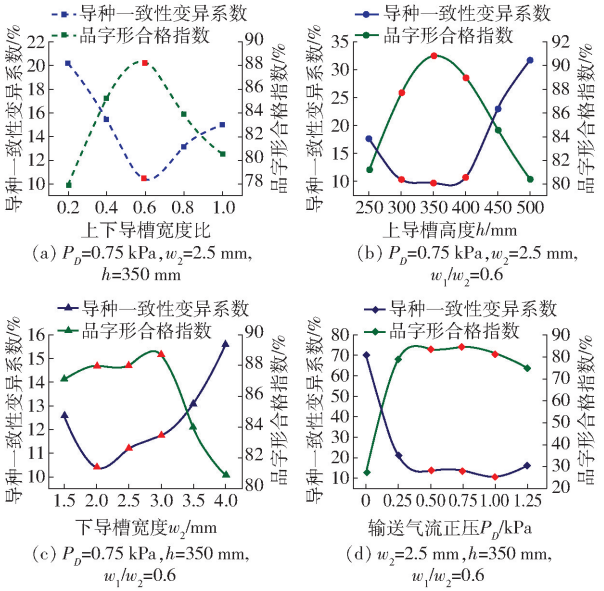


(a)上、下导槽宽度比0.2 (b)上、下导槽宽度比0.4 (c)上、下导槽宽度比0.6 (d)上、下导槽宽度比0.8 (e)上、下导槽宽度比1.0

图 15 不同导槽宽度比种子速度轨迹

Fig. 15 Seed velocity trajectory diagrams of different air-attached guide groove width ratio

300 ~ 400 mm、下导槽宽度 2 ~ 3 mm、输送气流正压 0.5 ~ 1.0 kPa 区间内导种装置导种一致性变异系数较小，品字形合格指数较高。



(a) P_D=0.75 kPa，w_2=2.5 mm，h=350 mm　(b) P_D=0.75 kPa，w_2=2.5 mm，w_1/w_2=0.6

(c) P_D=0.75 kPa，h=350 mm，w_1/w_2=0.6　(d) w_2=2.5 mm，h=350 mm，w_1/w_2=0.6

图 16　单因素试验中各因素性能曲线

Fig. 16　Influence of each factor on index in single factor test

4　台架试验

4.1　试验条件

基于仿真试验结果进行台架性能试验，以探究正压气流导槽式导种装置最优导种性能结构参数。试验材料选取与仿真试验相同的玉米种子“和育 187”，试验地点选在黑龙江八一农垦大学高速精量播种实验室，主要试验仪器有正压气流导槽式导种装置、双盘气压式排种器、供种装置、JPS - 16 型播种性能检测试验台、HTB100 - 304 型多段式鼓风机、DP2000 智能压力风速风量仪、PCO. dimax. CS 高速摄像机等，如图 17 所示。试验时，将排种器与导种装置固定在安装台架上，种床带朝向导种装置投种方向运动，模拟播种机前进运动状态，前进速度固定为 14 km/h；双喷油泵在种床带上形成两条油带，由供种装置向排种器与导种装置供给种子，由风机提供整体输送气流。

玉米种子经过供种、排种、导种环节从投种口落至油带模拟播种过程，取 1 000 mm 种床带播种结果，同仿真试验结合式(12)、(13)计算品字形合格指数，台架试验品字形播种效果如图 18 所示。

PCO. dimax. CS 高速摄像机可实现导种装置内部种子可视化处理，通过高速摄像与图像目标追踪技术定位装置投种口经过的玉米种子，以. raw4 格式保存视频并导入 TEMA 软件。台架背景设置标定板，结合式(13)统计投种口坐标种子时差，计算

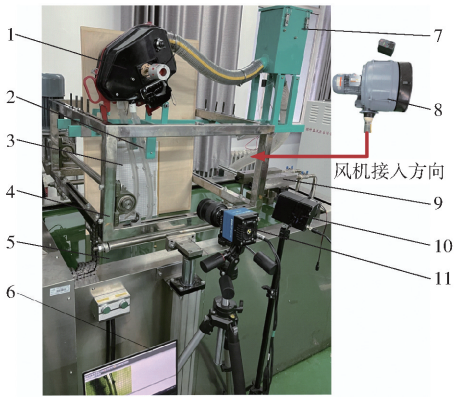


图 17　试验台架

Fig. 17　Test bed

1. 排种器　2. 导种装置　3. 标定板　4. 试验台　5. 种床带　6. 计算机　7. 供种装置　8. 鼓风机　9. 喷油装置　10. LED 灯　11. 高速摄像机

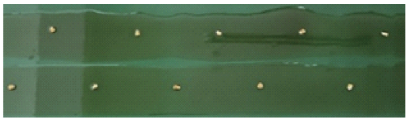


图 18　台架试验播种效果

Fig. 18　Bench test seeding effect

导种一致性变异系数。

4.2　正交试验

4.2.1　试验方案

为了精确导种装置最优结构参数，基于单因素试验结果确定上导槽高度 x_1 为 300 ~ 400 mm，下导槽宽度 x_2 为 2.0 ~ 3.0 mm，输送气流正压 x_3 为 0.5 ~ 1.0 kPa，以品字形合格指数 Z_1、导种一致性变异系数 Z 为指标进行三因素三水平 Box - Behnken 试验设计，试验因素编码如表 4 所示。

表 4　试验因素编码

Tab. 4　Test factors and codes

编码	因素		
	x_1/mm	x_2/mm	x_3/kPa
-1	300	2.0	0.50
0	350	2.5	0.75
1	400	3.0	1.00

4.2.2　试验结果与分析

利用 Design-Expert 13 分析软件对试验结果进行回归分析，试验方案与试验结果如表 5 所示(X_1、X_2、X_3 为因素编码值)。二次方程方差分析如表 6 所示。

通过 Design-Expert 13 软件对试验数据进行因素方差分析，筛选出较为显著影响因素，进而得到性能指标与因素编码值回归方程

$$Z_1 = 91.68 + X_1 - 1.35X_2 - 0.52X_3 - 4.86X_1X_2 + 3.65X_1X_3 - 2.35X_1^2 - 2.79X_2^2 - 7.23X_3^2 \quad (15)$$

表 5 试验方案与结果

Tab. 5 Test scheme and results

编号	因素			Z_1/%	Z/%
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	82.07	7.14
2	1	-1	0	94.02	8.92
3	-1	1	0	88.77	9.95
4	1	1	0	81.29	9.78
5	-1	0	-1	86.05	9.17
6	1	0	-1	80.51	14.24
7	-1	0	1	76.38	13.15
8	1	0	1	85.45	12.98
9	0	-1	-1	82.56	8.51
10	0	1	-1	80.46	10.45
11	0	-1	1	83.12	9.87
12	0	1	1	80.46	11.45
13	0	0	0	90.17	6.53
14	0	0	0	91.89	6.35
15	0	0	0	92.14	6.22
16	0	0	0	92.08	5.33
17	0	0	0	92.10	6.03

表 6 方差分析

Tab. 6 Analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
品字形合格指数	模型	471.04	9	52.34	54.83	<0.000 1 **
	X_1	8.00	1	8.00	8.38	0.023 2 *
	X_2	14.55	1	14.55	15.25	0.005 9 **
	X_3	2.17	1	2.17	2.28	0.175 0
	X_1X_2	94.38	1	94.38	98.87	<0.000 1 **
	X_1X_3	53.36	1	53.36	55.90	0.000 1 **
	X_2X_3	0.078 4	1	0.078 4	0.082 1	0.782 7
	X_1^2	23.16	1	23.16	24.27	0.001 7 **
	X_2^2	32.85	1	32.85	34.41	0.000 6 **
	X_3^2	220.28	1	220.28	230.76	<0.000 1 **
	残差	6.68	7	0.954 6		
	失拟	3.81	3	1.27	1.77	0.291 9
	误差	2.87	4	0.718		
	总和	477.72	16			
导种一致性变异系数	模型	114.98	9	12.78	40.08	<0.000 1 **
	X_1	5.30	1	5.30	16.62	0.004 7 **
	X_2	6.46	1	6.46	20.27	0.002 8 **
	X_3	3.23	1	3.23	10.12	0.015 5 *
	X_1X_2	0.950 6	1	0.950 6	2.98	0.127 8
	X_1X_3	6.86	1	6.86	21.53	0.002 4 **
	X_2X_3	0.032 4	1	0.032 4	0.101 6	0.759 2
	X_1^2	28.14	1	28.14	88.28	<0.000 1 **
	X_2^2	0.307 5	1	0.307 5	0.964 7	0.358 7
	X_3^2	57.88	1	57.88	181.59	<0.000 1 **
	残差	2.23	7	0.318 8		
	失拟	1.37	3	0.457 3	2.13	0.239 3
	误差	0.859 3	4	0.214 8		
	总和	117.22	16			

注：** 表示极显著（$P<0.01$）；* 表示显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

$$Z=6.09+0.813\,8X_1+0.898\,8X_2+0.635X_3-1.31X_1X_3+2.59X_1^2+3.71X_3^2 \quad (16)$$

由式(15)、(16)可知各因素对品字形合格指数的影响由大到小为：X_2、X_1、X_3；对导种一致性变异系数的影响由大到小为：X_2、X_1、X_3。为直观地分析试验指标与因素间关系，通过 Design-Expert 13 软件得到响应曲面。因交互作用项 X_1X_3 对试验性能指标影响均显著，故分析上导槽高度 X_1 和输送气流正压 X_3 的交互作用对试验性能指标的影响，如图 19 所示。

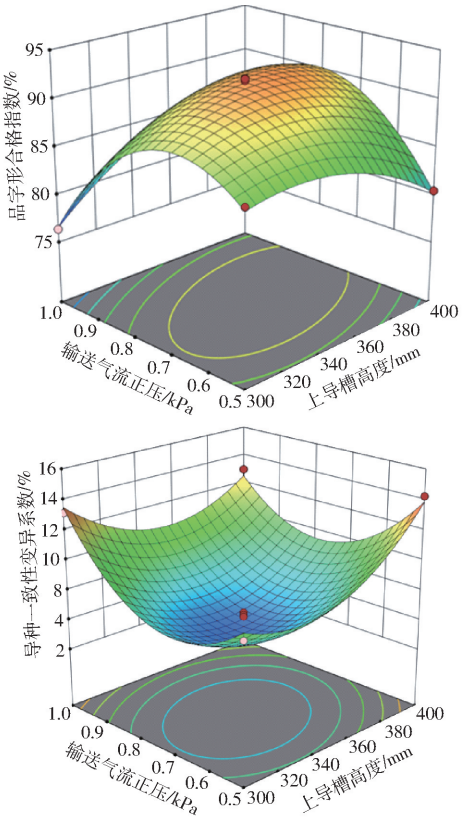


图 19 因素交互作用响应曲面($X_2=0$)

Fig. 19 Factor interaction response surfaces

由图 9 可知，当上导槽高度为定值时，品字形合格指数随着输送气流正压的增加呈先增大后减小的趋势；当输送气流正压一定时，品字形合格指数随上导槽高度的增加呈先增大后减小的趋势。当上导槽高度与输送气流正压分别为定值时导种一致性变异系数与与品字形合格指数增减趋势相反。原因为上导槽高度过低时，引种时间过长，且过低的上导槽高度会使竖直段附种过程较短，种子未经完全引种就进入下导槽段附种导致种子重心偏移易引发碰撞；上导槽高度过高会因引种角度过大导致装置内种子碰撞加剧。输送气流正压较低时，导槽吸附力过小导致导槽失去引附约束种子作用；输送气流正压较高时会加剧装置管壁对种子的碰撞，且当正压值超过了阈值会导致在气流出口处出现乱流现象扰乱种

子导种动态，造成种子阻塞。

4.2.3　参数优化

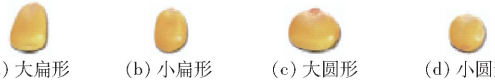
为得到导种装置作业性能最优组合参数，以品字合格指数 Z_1 最高与导种一致性变异系数 Z 最低为优化目标，建立目标函数约束条件为

$$\begin{cases} \max Z_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Z(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{17}$$

通过优化求解，得出 x_1 为 354.491 mm、x_2 为 2.245 mm、x_3 为 0.739 kPa 时，导种均匀性与品字形播种效果最佳。在最优组合下 Z_1 为 91.924%、Z 为 5.803%。为验证参数优化结果，在 JPS－16 型播种性能检测试验台上进行验证试验，结合实际试验条件设置上导槽高度 355 mm、下导槽宽度 2.2 mm、输送气流正压 0.74 kPa，设置种床带速度为 14 km/h。根据优化结果进行台架验证试验，可得品字形合格指数为 91.791%，导种一致性变异系数为 6.111%，与优化结果基本一致。

4.2.4　适播试验

为探究导种装置在最优参数组合下对不同类型玉米的适播情况，将“和育 187”（大扁形）、“奥洋红 A9”（小扁形）、“迪卡 C2235”（大圆形）、“法尔利 143”（小圆形）4 种玉米作为试验对象，如图 20 所示。以最优参数组合在 JPS－16 播种试验台上进行试验，得到试验结果如表 7 所示。



(a) 大扁形　(b) 小扁形　(c) 大圆形　(d) 小圆形

图 20　不同类型玉米种子

Fig. 20　Different types of corn seeds

表 7　适播试验结果

Tab. 7　Results of suitability trials　%

品种	品字形合格指数	导种一致性变异系数
和育 187	91.8	6.15
奥洋红 A9	90.8	7.01
迪卡 C2235	91.1	6.81
法尔利 143	90.2	7.07

4 种类型种子品字形合格指数、导种一致性变异系数极差分别为 1.6%、0.92%，品字形合格指数均大于 90%，导种一致性变异系数均小于 7.1%，与优化结果差值较小，说明正压气流导槽式导种装置在最优参数组合下对 4 种类型种子适播性较好，能够满足不同尺寸形状玉米种子作业。

4.3　台架验证试验

在播种作业时零速投种的实现需要种子投种水平分速度与作业速度相匹配，而此时投种竖直分速度会使种子投种后接触土壤、镇压轮而引起碰撞与弹跳。当种子以一定速度投种时，种子出射角会影响投种竖直分速度。在台架试验中种床带无法模拟还原种子弹跳对品字形合格指数的影响，因此在导种装置下方设置 1 500 mm × 1 000 mm 矩形台，在其上铺设 100 mm 厚度的土壤；在输送气流正压 0.74 kPa、离地间隙 150 mm 的工作参数下，对导槽式导种装置与气力式导种管开展种子的弹跳试验，并设置镇压轮固定在导种装置投种口处进行对照组试验，试验过程如图 21a 所示。



(a) 试验过程　(b) 玉米种子高速捕捉图像

图 21　弹跳试验

Fig. 21　Bounce test diagrams

利用高速摄像机记录种子投种出射过程，以镇压轮靠近投种口侧半圆切线 x 轴垂直投影中点为投种坐标零点，记录玉米种子首次触土时投种坐标零点距离，根据播种机前进速度设玉米种子触土点在投种坐标零点 −5 ~ 5 mm 范围区间内为投种合理范围。同时每组试验记录种子首次触土弹跳到达最高点的位置作为标定高度 H_t，每组试验选取 20 粒种子统计接触情况并计算平均高度。设置导种装置出射角分别为 0°、10°、20°、30°、40°、50°、60°。通过调整排导种装置整体角度来相应调整导种装置出射角 ξ。试验结果如图 22 所示。

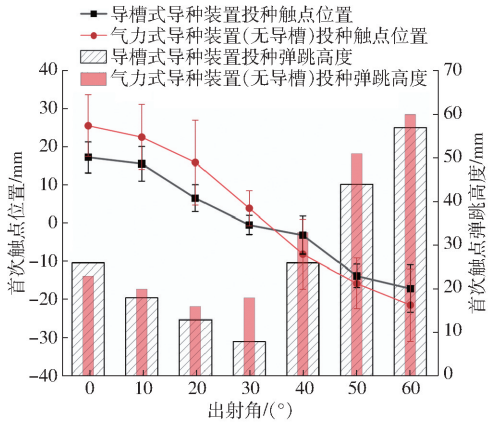


图 22　弹跳试验结果

Fig. 22　Bounce test results

试验结果表明，当离地间隙为 150 mm、输送气流正压为 0.74 kPa 时，两个导种装置投种触点位置距离投种坐标零点随着出射角的增加呈先减小后增大趋势，随着试验重复次数增加，气力式导种管投种触点误差相较导槽式导种装置更大，难以控制种子

投种触点。随着出射角的增加,两种导种装置的投种弹跳高度呈先减小后增大趋势,当出射角为 30°时,导槽式导种装置弹跳高度可以控制在 10 mm 以下,能够以更稳定的投种姿态进行后续镇压工作。拟定出射角为 30°与 40°进行对照组试验,记录种子投种后与镇压轮的接触情况,玉米种子接触土壤时距离在投种合理范围内统计种子比例为 t_1,当小于该范围即接触土壤弹跳统计种子比例为 t_2,当大于该范围即接触镇压轮弹跳统计种子比例为 t_3,每组各统计 100 粒种子弹跳接触位置,结果见表 8。试验结果表明 $\xi=30°$为最佳出射角。

表 8 对照组试验结果

Tab. 8 Control group test %

试验方法		t_1	t_2	t_3
$\xi=30°$	导槽式	91	5	4
	气力式	74	14	12
$\xi=40°$	导槽式	77	18	5
	气力式	55	30	15

5 田间试验

为了最终验证正压气流导槽式导种装置优化结果对玉米品字形播种效果的影响,进行田间试验,播种测试地点为红兴隆管理局农机具作业田,播种环境有效积温 20 ~ 24℃,环境相对湿度 36%,平均播种深度为 30 mm,田间试验作业行数为 6 行,试验玉米种子选择与仿真、台架试验相同的“和育 187”品种,田间试验如图 23 所示。通过五点取样法对样本取样,测定样点 1 m 内种子品字形合格指数,重复测量 3 次并取平均值。参考 JB/T 10293—2013《单粒(精密)播种机技术条件》,在单行种子粒距为(10 cm, 20 cm]下,应满足品字形合格指数大于等于 70%。



图 23 田间试验

Fig. 23 Field test

试验结果如表 9 所示,在作业速度 12 ~ 16 km/h 工况中,田间试验测得品字形合格指数受土壤湿温与多具单体连接振动的影响略微下降,但与台架试验差值均小于 5%,且随着作业速度提升,品字形合格指数下降程度亦降低。由此现象再次验证正压气流导槽式导种装置作业稳定性,对高速作业适应性较好。品字形合格指数稳定在 85% 以上,满足 2BDQ 系列玉米品字形高速精量播种机作业要求。

表 9 品字形合格指数试验结果对比

Tab. 9 Test results of delta-row qualification index

%

试验类型	作业速度/(km·h^{-1})				
	12	13	14	15	16
台架试验	90.73	90.19	91.79	87.37	85.10
田间试验	87.44	88.86	88.96	86.40	85.05

6 结论

(1)针对 2BDQ 系列玉米品字形高速精量播种机播种需求,设计一种正压气流导槽式导种装置。阐述了总体结构与工作原理,对导种管体及上下组合式导槽进行结构设计,建立玉米种子在导槽上引种、附种过程的力学模型,分析种子在装置内流场受力情况,确定了影响导种效果的主要因素有上导槽高度和上、下导槽宽度及宽度比与输送气流正压。

(2)应用 DEM - CFD 耦合仿真方法,定义品字形合格指数与导种一致性变异系数指标,通过种子速度轨迹分析与单因素试验确定上导槽与下导槽宽度比为 0.6 的优化结构,并通过单因素试验确定上导槽开槽高度 300 ~ 400 mm、下导槽宽度 2 ~ 3 mm、输送气流正压 0.5 ~ 1.0 kPa 时品字形播种效果较好。

(3)使用 JPS - 16 型高速播种性能检测试验台,通过多因素试验建立了品字形合格指数、导种一致性变异系数与影响因素之间的回归模型,确定了最优参数组合为:上导槽高度 354.491 mm、下导槽宽度 2.245 mm、输送气流正压 0.739 kPa。该参数组合下品字形合格指数为 91.924%、导种一致性变异系数为 5.803%,通过试验对优化结果进行验证,偏差与预期相符。在导种装置最优参数组合下进行了 4 种类型玉米种子适播试验,品字形合格指数均大于 90%,导种一致性变异系数均小于 7.1%。

(4)田间试验表明,播种机不同作业速度条件下受环境影响较小,品字形合格指数均在 85% 以上,与台架试验结果差值不超过 5%,满足 2BDQ 系列玉米品字形高速精量播种机作业要求。

参 考 文 献

[1] 薛兵东,刘永富,张丽丽,等. 不同耕作方式对辽东南玉米生长发育及产量的影响[J]. 农业科技通讯,2023(9):57 - 59,63.

[2] 王克如,李璐璐,鲁镇胜,等. 黄淮海夏玉米机械化粒收质量及其主要影响因素[J]. 农业工程学报,2021,37(7):1 - 7.
WANG Keru, LI Lulu, LU Zhensheng, et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 1 - 7. (in Chinese)
[3] 张淯朋,衣淑娟,戴智博,等. 玉米双行高速精量播种机的研制[J]. 中国农机装备,2023(9):13 - 18.
ZHANG Yupeng, YI Shujuan, DAI Zhibo, et al. Development of high-speed precision seeder of corn with double-row planting [J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(9): 13 - 18. (in Chinese)
[4] 牛学智. 玉米增产种植新技术[J]. 吉林农业,2014(2):47 - 49.
[5] 孙文胜,衣淑娟,齐海龙,等. 窄行密植品字形播种技术装备研究进展[J]. 农业工程,2024,14(5):5 - 9.
SUN Wensheng, YI Shujuan, QI Hailong, et al. Research progress on narrow row and dense planting delta-row seeding technology and equipment[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(5): 5 - 9. (in Chinese)
[6] 潘海福,戴飞,史瑞杰,等. 基于 AquaCrop 模型的玉米全膜双垄沟播技术研究[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 1):78 - 86.
PAN Haifu, DAI Fei, SHI Ruijie, et al. Soil moisture modeling of corn full-film double ridge ditch sowing based on AquaCrop model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 78 - 86. (in Chinese)
[7] 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)
[8] LI Y, BAI Y, ZHANG X, et al. Structural design and simulation analysis of a dual-row pneumatic vegetable precision planter [J]. Processes, 2023, 11(6): 1803.
[9] LI Qichao, FENG Jinlong, WEI Jiang. Design and experiment on precision seed metering device for narrow-row and dense planting of soybean[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2022, 67(2):353 - 363.
[10] 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)
[11] 余佳佳,丁幼春,廖宜涛,等. 基于高速摄像的气力式油菜精量排种器投种轨迹分析[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3):103 - 108.
YU Jiajia, DING Youchun, LIAO Yitao, et al. High-speed photography analysis of dropping trajectory on pneumatic metering device for rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014,33(3):103 - 108. (in Chinese)
[12] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(12):1 - 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1 - 14. (in Chinese)
[13] 邢赫,臧英,曹晓曼,等. 水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J]. 农业工程学报,2015,31(12):23 - 30.
XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23 - 30. (in Chinese)
[14] Monoseed TC[EB/OL]. (2020 - 08 - 10)[2024 - 08 - 10]. http://www.seedmech.com/producto/moonseed-tc/.
[15] VADERSTAD A B. Zone 3-seed placement[EB/OL]. (2020 - 08 - 10)[2024 - 08 - 10]. http://www.vaderstad.com/en/planting/tempo-planter/tempor-12-18/#zone-4777.
[16] 刘瑞,刘云强,刘忠军,等. 玉米高速精量播种机正压气流辅助吹送导种装置研究[J]. 农业机械学报,2023,54(7):156 - 166.
LIU Rui, LIU Yunqiang, LIU Zhongjun, et al. Research on positive pressure airflow assisted blowing and seed guiding device of corn high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 156 - 166. (in Chinese)
[17] 韩建锋,杜娟慧,顾昕,等. 小麦分引组合式双行宽条带导种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(11):35 - 46.
HAN Jianfeng, DU Juanhui, GU Xin, et al. Design and test of the separate and combined double row wide strip seed guiding device for wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(11): 35 - 46. (in Chinese)
[18] 王龙宝,杨翰瑜,王庆杰,等. 小麦气流辅助直线投种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):111 - 120.
WANG Longbao, YANG Hanyu, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of air-assisted linear seeding device for wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):111 - 120. (in Chinese)
[19] 马成成,衣淑娟,陶桂香,等. 带式玉米高速导种装置旋夹纳种机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报,2023,54(7):134 - 143.
MA Chengcheng, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of corn seeds receiving by rotating clamp of belt-type high-speed seed guiding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 134 - 143. (in Chinese)
[20] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等. 窄行密植西洋参精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1):92 - 103.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of narrow-row-dense-planting precision planter for american ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 92 - 103. (in Chinese)
[21] 孙良,刘兵,陈旋,等. 差速水稻钵苗 Z 字形宽窄行移栽机构设计[J]. 农业工程学报,2017,33(17):18 - 27.

SUN Liang, LIU Bing, CHEN Xuan, et al. Design of differential transplanting mechanism for zigzag wide-narrow row rice pot seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 18 - 27. (in Chinese)

[22] ZHOU L, YU J Q, WANG Y, et al. A study on the modelling method of maize-seed particles based on the discrete element method[J]. Powder Technology, 2020, 374: 353 - 376.

[23] TANG Han, GUAN Tianyuan, XU Fudong, et al. Test on adsorption posture and seeding performance of the high-speed precision dual-chamber maize metering device based on the seed characteristics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108471.

[24] 衣淑娟,陈涛,李衣菲,等. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):83 - 94.
YI Shujuan, CHEN Tao, LI Yifei, et al. Design and test of millet hill-drop seed-metering device with combination of positive-negative pressure and hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 83 - 94. (in Chinese)

[25] 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.

[26] 郭鹏,郑效帅,王东伟,等. 气力辅助充种式花生精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):64 - 74.
GUO Peng, ZHENG Xiaoshuai, WANG Dongwei, et al. Design and experiment of precision seed metering device with pneumatic assisted seed-filling for peanut[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 64 - 74. (in Chinese)

[27] 刘瑞,刘忠军,刘立晶,等. 玉米扰动辅助充种高速气吸式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):50 - 59.
LIU Rui, LIU Zhongjun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of corn high speed air suction seed metering device with disturbance assisted seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 50 - 59. (in Chinese)

[28] 史嵩,刘虎,位国建,等. 基于 DEM - CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):54 - 66.
SHI Song, LIU Hu, WEI Guojian, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 54 - 66. (in Chinese)

(上接第 260 页)

[27] ZHAO Runmao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. A novel approach for describing and classifying the unevenness of the bottom layer of paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 552 - 560.

[28] TU Tuanpeng, HE Jie, LUO Xiwen, et al. Methods and experiments for collecting information and constructing models of bottom-layer contours in paddy fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107719.

[29] 孙永健, 郑洪帧, 徐徽, 等. 机械旱直播方式促进水稻生长发育提高产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 10 - 18.
SUN Yongjian, ZHENG Hongzhen, XU Hui, et al. Mechanical dry direct-sowing modes improving growth, development and yield of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 10 - 18. (in Chinese)

[30] 杜攀. 浮动悬挂式激光平地机设计与试验研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
DU Pan. Design and experimental study of the floating suspended laser grader[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[31] ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and test of laser-controlled paddy field levelling-beater[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(1): 57 - 65.

[32] 刘刚, 林建涵, 司永胜, 等. 激光控制平地系统设计与试验分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 71 - 74.
LIU Gang, LIN Jianhan, SI Yongsheng, et al. Development and experiment on laser controlled leveling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 71 - 74. (in Chinese)

[33] 汪沛, 冯达文, 陈高隆, 等. 农田精准平整过程中三维地形实时测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 41 - 48.
WANG Pei, FENG Dawen, CHEN Gaolong, et al. Real-time 3D terrain measurement method and experiment in farmland leveling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 41 - 48. (in Chinese)

[34] 胡炼, 彭靖怡, 赖桑愉, 等. 基于 BDS 和 IMU 的挖掘机铲斗位姿测量方法与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 12 - 19.
HU Lian, PENG Jingyi, LAI Sangyu, et al. Method and experiments of excavator bucket position and attitude measurement using BDS and IMU[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 12 - 19. (in Chinese)