doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.02.003

基于分散机制的条播小麦播量监测装置设计与试验

谢建华[1,2]　金姣阳[1]　岳增祥[1]　马卫彬[1,2]　冯　浩[1]

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

摘要:针对小麦播种过程中因播量增大及高效播种产生的排种频率过高而导致高速种子流监测精度不足的问题,提出了一种将高频率种子流分散为多路低频率种子流并行监测的方法,设计了一种基于分散机制与对射式红外光电传感器相结合的小麦种子流监测装置。通过分析种子流在分散装置中的运动状态,建立了种子流在分散装置内的运动模型,确定了影响分散性能的关键因素。利用离散元法(Discrete element method,EDEM)仿真麦种通过分散装置的动态过程并对参数优化,获得最优参数为上分散板半径 52.70 mm、上分散板倾角 5.41°、下分散板半径 64.95 mm、下分散板倾角 7.48°和两分散板垂直距离 13.59 mm,而分散均匀性变异系数为 21.06%。采用最优参数进行分散性能台架验证试验,结果显示分散均匀性变异系数不大于 21.94%,台架与仿真试验结果相比相对误差不超过 5%。采用对射式红外光电传感器采集种子掉落信号,经电容滤波、双级放大、半波整流、电压比较及单稳态触发处理,获得 8 路独立且可供单片机捕捉的脉冲信号,单片机通过中断服务程序对各通道种子计数并累计求和。搭建了高频率小麦播量监测系统及监测精度试验台,试验结果表明,加入补偿后播种量在 375 kg/hm^2 内,监测精度不低于 95.34%。该监测装置可为条播小麦高效精量播种的播量监测研究提供技术支持。

关键词:小麦播种;分散装置;参数优化;离散元法仿真;播量监测

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)02-0019-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Strip-sowing Wheat Sowing Quantity Monitoring Device Based on Dispersion Mechanism

XIE Jianhua[1,2]　JIN Jiaoyang[2]　YUE Zengxiang[1]　MA Weibin[1,2]　FENG Hao[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment*, *Urumqi* 830052, *China*)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient monitoring accuracy of high-speed seed flow caused by increased seeding rates and high-efficiency seeding during wheat sowing, a method was proposed to disperse high-frequency seed flow into multiple low-frequency seed flows for parallel monitoring. A wheat seed flow monitoring device, combining a dispersion mechanism with through-beam infrared photoelectric sensors, was designed. By analyzing the movement of the seed flow within the dispersion device, a motion model was established, identifying the key factors affecting dynamic process of wheat seeds passing through the dispersion device was simulated by using the discrete element method (EDEM). Firstly, parameter optimization tests were conducted on a single dispersion plate, yielding optimal mechanism parameters: an upper dispersion plate radius of 52.70 mm and an angle of 5.41°. Building on this parameter optimization tests for a double dispersion plate were performed, resulting in optimal parameters of a lower dispersion plate radius of 64.95 mm, an inclination angle of 7.48°, and a vertical distance of 13.59 mm between the two plates. Under these conditions, the coefficient of variation for dispersion uniformity did not exceed 21.06%. A bench test of the dispersion performance was conducted by using the optimal parameters. Results showed that the coefficient of variation for dispersion uniformity was no more than 21.94%, with an error between bench test and simulation results of less than 5%. A collimated infrared photoelectric sensor was employed to collect seed drop signals. After capacitor filtering, two-stage amplification, half-wave rectification, voltage comparison, and monostable triggering processing, eight independent pulse signals were generated, which could be captured by the

收稿日期:2025-07-17　修回日期:2025-08-14

基金项目:新疆维吾尔自治区小麦产业技术体系项目(XJARS-01-09)

作者简介:谢建华(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装置设计及监测技术研究,E-mail:xjh199032@163.com

microcontroller. The microcontroller, via an interrupt service routine, counted seeds in each channel and accumulated the total, thereby establishing a high-frequency wheat seeding amount monitoring system. Bench tests of monitoring accuracy demonstrated that accuracy was no less than 95.34% within a seeding rate of 375 kg/hm^2. This monitoring device can provide technical support for research on accurate and efficient seeding volume monitoring in strip-sown wheat.

Key words: wheat seeding; dispersing mechanism; parameter optimization; discrete element simulation; seeding rate monitoring

0 引言

小麦是我国最重要的口粮作物之一,种植面积广、产量高,对国家粮食安全至关重要[1]。保障预期产量的核心在于实现足够的单位面积有效出苗数,这直接依赖于单位面积播种量的精准控制与稳定执行[2-3]。能够实时、精准地监测播种量,对于提升种植效率、保障粮食产量具有深远的意义。

在播量监测技术领域,国内外学者进行了持续探索。国外研究中,KUMAR 等[4]开发了基于单一红外传感技术的种子流监测装置,用于检测导种管中小麦种子的流动状态及堵塞。MC ELECTRONICS[5]、John Deere[6]和 Precision Planting 公司[7]则分别推出了基于声波或单一光电传感器的监测设备,可获取排种总量、漏播率等参数。类似的,文献[8-12]主要利用单一红外光电传感器实现了对小麦、玉米等作物播量或播种质量信息的采集。为了提升监测性能,研究者们转向了多传感器信息融合的技术路线。丁幼春等[13-15]在油菜精量播种监测中,将旋转编码器与光电传感器结合,通过关联两者信息估算播量。贾洪雷等[16]则采用光电传感器结合旋转编码器监测气吸式排种器的吸种性能。黄东岩等[17]创新性地将压电薄膜传感器应用于排种监测,感知种子碰撞产生的应力波。纪超等[18]研发的玉米排种质量监测系统也体现了多源信息集成的思路。这些融合方案显著提高了在精量播种条件下的监测准确性。然而,融合方案通常系统更复杂成本增加,且在种子流密度极高时其性能提升仍面临挑战,因此探索新型传感原理是另一重要方向。文献[19-22]依据种子介电特性,分别开发了基于电容变化的水稻、玉米和棉花排种量监测系统。这类方法不依赖光学路径,对灰尘等环境因素不敏感。但电容法易受物料湿度和堆积状态等因素干扰,信号处理复杂,在高速、大播量条件下信号的稳定性和分辨率仍需提高。

在深入理解种子流动态行为和优化播种部件设计方面,EDEM 作为一种模拟散粒体运动与相互作用的强大数值工具,近年来在农业工程领域得到了广泛应用。文献[23-25]利用 EDEM 成功模拟了小麦和玉米在排种过程中的流动、碰撞和堆积过程。这些研究表明,EDEM 能够有效地揭示高密度种子流的微观力学行为和宏观流动特性,为排种器性能预测、结构优化以及新型监测方法的设计提供了重要理论依据和仿真平台。

综上所述,现有的播种量监测装置主要针对玉米和大豆等中大型种子或精、少量播种设计,其传感原理在处理条播小麦高密度流时普遍存在信号饱和、重叠或漏检问题,无法满足大播量小麦实时高精度监测的需求[26]。基于此,结合离散元法在模拟分析种子流行为方面优势,本文提出将单路高频率和高密度的小麦种子流主动分散为多路低频率和低密度的种子流,并利用成熟可靠的对射式红外光电传感器进行多路监测,通过汇总各路信息获得总播量。据此,设计一种集成分散机制与红外传感单元的小麦播量监测装置,并对其关键性能进行测试,为条播小麦高效精量播种的播量监测研究提供技术支持。

1 播量监测装置结构及工作原理

1.1 播量监测装置结构

小麦条播广泛采用外槽轮排种器,其旋转时,每个齿槽推送的种子形成种子簇,连续运转则簇间间隔消失,产生密集种子流。在此状态下,多粒种子同时遮挡光电传感器光线时易被误判为单粒,导致漏测。相比之下,精播模式下粒距大,种子体积大,光电传感器可实现单粒准确计数。因此,若能将条播的高密度种子流预处理成离散状态,可有效降低重叠遮挡导致的监测误差和难度。为此,本文设计一种大播量小麦播量监测装置,核心包括分散装置(含上、下分散板及分隔板)、平行通道和信号监测系统(含对射式红外光电传感器组及单片机),如图 1 所示。该装置核心功能是将连续高密度种子流转化为具有显著颗粒间隙的断续流,大幅减少多粒同时遮挡光线的概率。综合考虑可供安装的位置与种流分散效果,装置安装在排种器下方,为长 100 mm、宽 108 mm 和高 70 mm 的长方体。

1.2 工作原理

研发的高频率小麦播量监测传感装置安装在任一小麦排种器下端。排种器排出的高频率种流经聚

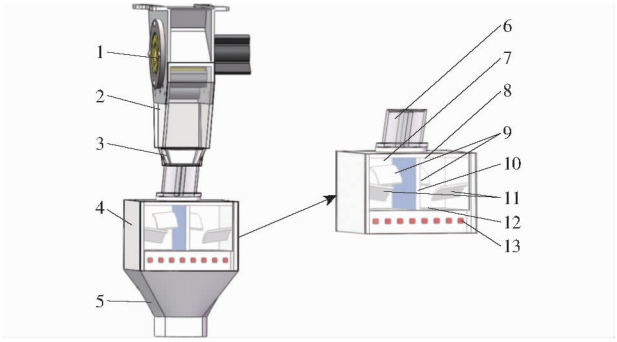


图 1　监测装置安装位置及组成示意图

Fig. 1　Schematic of installation location and composition of monitoring device

1. 排种器　2. 斜面腔室　3. 聚合变形接头　4. 播量监测装置　5. 出种变形接头　6. 斜圆柱通道　7. 左腔室　8. 右腔室　9. 上分散板　10. 分隔板　11. 下分散板　12. 平行通道　13. 对射式红外光电传感器

合变形接头聚集后，从装置入种口进入，被分隔板分成两股，分别撞击上、下分散板，随后流入平行通道形成 8 路低频种子流。每路种子流独立穿过红外对射传感器光线，种子遮挡引起传感器接收端电压变化，该变化信号经滤波、放大、整流、电压比较及单稳态触发等数字化处理后，生成 8 路单脉冲序列，作为单片机外部中断源，实现精准计数。监测后的 8 路种子流最终经出种变形接头汇聚排出。

2　播量监测装置设计

为实现播种作业过程中小麦种子流的在线实时监测，准确获取播种量信息，核心在于将密集和连续下落的种子流均匀分散至 8 条独立的平行通道，并精确识别通过各通道的种子粒数。该装置需满足以下关键要求：确保种子能够以接近相等的概率落入各通道，避免通道间落种数量差异过大；装置设计需有效引导种子，防止其在分散过程中跳出装置范围或在关键部位堆积堵塞；监测系统需能稳定、准确地捕捉并识别不同粒径种子通过各通道时产生的信号，抵抗环境光干扰；装置尺寸需适应现有播种机监测点的安装空间限制。

2.1　种子运动轨迹运动学分析

为支撑分散装置的设计，需对下落种子与分散板相互作用过程中的运动轨迹进行理论分析。基于碰撞力学原理，研究该装置实现种子有效分散的机理，预测种子在装置内的运动行为，进而识别并确定影响种流分散均匀性的关键装置参数及其合理取值范围，为装置设计提供理论依据。

对小麦种子运动轨迹分析过程中，需用到排种器出种口斜面、上分散板以及下分散板的空间数学模型，因此需要对上述结构进行数学建模。为构建出种口斜面、上分散板和下分散板的数学空间模型，绝对坐标系如图 2 所示。

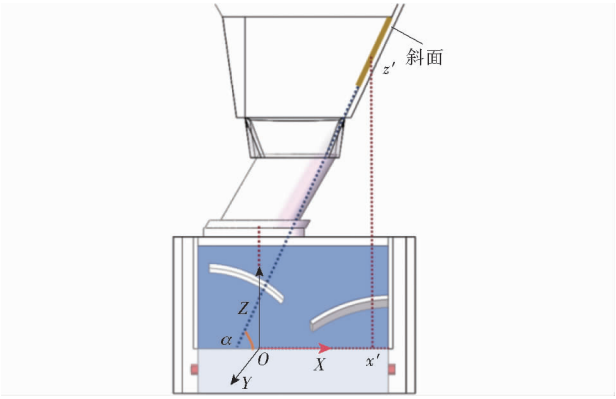


图 2　绝对坐标系与出种口斜面建模示意图

Fig. 2　Schematic of modeling inclined surface of seed outlet in absolute coordinate system

XOY 面与监测平行通道上表面贴合，将播量监测装置的斜圆柱通道下方中心投影在平行通道上表面，将该投影点设置为绝对坐标系原点 O。任取出种口斜面在 XOZ 投影面上的一点，其坐标为（x'，z'），排种器出种口斜面在其相对坐标系的空间曲面方程为

$$z = (x - x')\tan\alpha + z' \tag{1}$$

式中　α——出种口斜面与 X 轴正方向的倾角，(°)

为构建上分散板的数学空间模型，将其视为一段母线平行于其相对坐标系 Y 轴的圆柱曲面。该柱面由一段圆弧绕相对坐标系 Y 轴旋转扫掠形成。在柱面中心轴上建立相对坐标系，如图 3a 所示，上分散板在其相对坐标系的空间柱面方程为

$$y_a^2 + z_a^2 = R_a^2 \quad (\mu_1 \leqslant \mu \leqslant \mu_2) \tag{2}$$

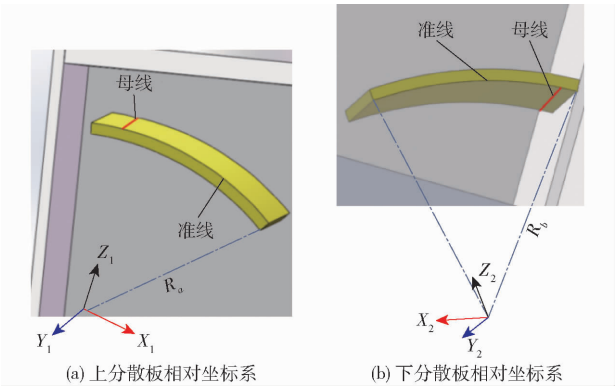
式中　μ——上分散板平面投影所对应圆弧的圆心角，(°)

μ_1——圆心角最小值，0°

μ_2——圆心角最大值，90°

R_a——上分散板半径，mm

为便于统一分析和计算，将相对坐标系中的曲



(a) 上分散板相对坐标系　(b) 下分散板相对坐标系

图 3　分散板建模

Fig. 3　Modeling of dispersion plate

面方程[27]转换到绝对坐标系中,如图 4 所示。

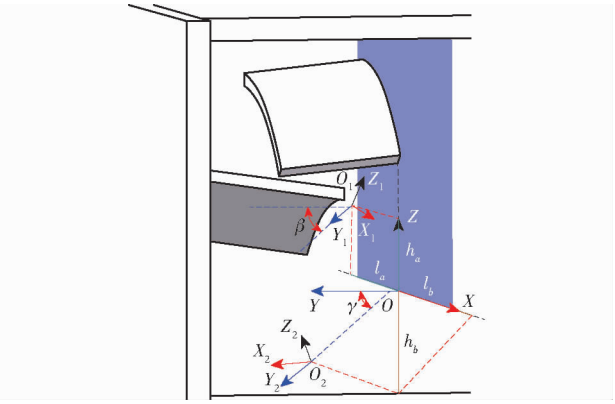


图 4 相对坐标转换绝对坐标示意图

Fig. 4 Schematic of converting relative coordinates to absolute coordinates

转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_\beta \\ z_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_o^A - l_a \\ z_o^A - h_a \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 β——上分散板母线与其相对坐标系 Y 轴负半轴之间的夹角,(°)

x_β——上分散板上任意一点在其相对坐标系中的 X 轴坐标

z_β——上分散板上任意一点在其相对坐标系中的 Z 轴坐标

x_o^A——上分散板上任意点在绝对坐标系中沿 X 轴坐标

z_o^A——上分散板上任意点在绝对坐标系中沿 Z 轴坐标

l_a——上分散板相对坐标系原点与绝对坐标系原点的水平距离,mm

h_a——上分散板相对坐标系原点与绝对坐标系原点的垂直距离,mm

将式(3)代入式(2)可得到上分散板在绝对坐标系空间曲面方程为

$$[(z_0^A - h_a)\cos\beta + (x_o^A - l_A)\sin\beta]^2 + (y_o^A)^2 = R_a^2 \tag{4}$$

式中 y_o^A——上分散板上任意点在绝对坐标系中沿 Y 轴的坐标值

同理可得下分散板在绝对坐标系下的空间曲面方程为

$$[(z_o^B - h_b)\cos\gamma + (x_o^B - l_b)\sin\gamma]^2 + (y_o^B)^2 = R_b^2 \tag{5}$$

式中 γ——下分散板母线与其相对坐标系 Y 轴负半轴之间的夹角,(°)

R_b——下分散板半径,mm

x_o^B——下分散板上任意点在绝对坐标系中沿 X 轴坐标

y_o^B——下分散板上任意点在绝对坐标系中沿 Y 轴坐标

z_o^B——下分散板上任意点在绝对坐标系中沿 Z 轴坐标

l_b——下分散板相对坐标系原点与绝对坐标系原点的水平距离,mm

h_b——下分散板相对坐标系原点与绝对坐标系原点的垂直距离,mm

根据排种器出种口斜面、上分散板与下分散板空间曲面方程,对种子下落轨迹进行分析。种子从排种舌到某一平行监测通道的运动分为 4 个轨迹段,分别为抛出段、滑行段、反弹段和跌落段,如图 5 所示。

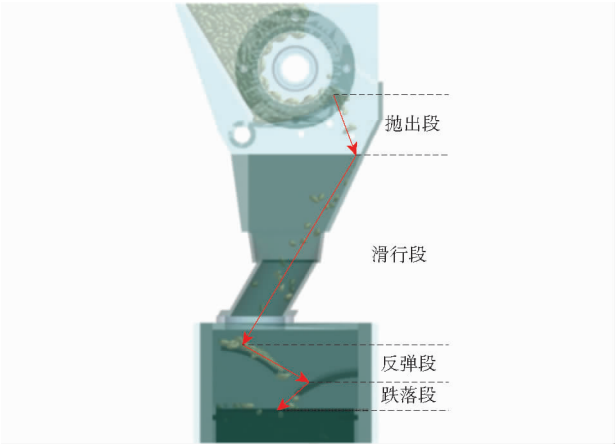


图 5 种子分散过程的运动轨迹

Fig. 5 Trajectory of seed dispersal process

各段均忽略种子形变、空气阻力及种子间相互作用,仅考虑重力与碰撞反作用力。由于监测装置整体成对称装置分布,所以仅分析右腔室内种子流运动情况就可得到左腔室种子流运动情况。

(1)抛出段:排种舌端至出种口斜面

设排种舌末端在绝对坐标系下的坐标为(X_0,Y_0,Z_0),种子在排种舌末端被外槽轮推出,在 XOZ 平面内做平抛运动,Y 轴速度方向分量为 0,轨迹方程为

$$\begin{cases} v_{x0} = \omega r \\ X_1 = v_{x0} t_1 + X_0 \\ Z_1 = Z_0 - 0.5 g t_1^2 \end{cases} \tag{6}$$

式中 ω——外槽轮角速度,rad/s

r——外槽轮半径,m

X_1——种子撞击斜面点在绝对坐标系 X 轴坐标

X_0——排种舌末端在绝对坐标系中 X 轴坐标

Z_1——种子撞击斜面点在绝对坐标系 Z 轴坐标

Z_0——排种舌末端在绝对坐标系中 Z 轴坐标

v_{x0}——种子 X 轴方向初速度，m/s

t_1——排种舌末端至出种口斜面运动时间，s

g——重力加速度，m/s^2

将式(6)代入出种口斜面方程式(1)解得运动时间为

$$t_1 = \frac{-v_{x0}\tan\alpha + \sqrt{v_{x0}^2\tan^2\alpha + 2g(Z_0 - z')}}{g} \tag{7}$$

种子撞击斜面之前沿 X 轴和 Z 轴速度 v_{x1} 和 v_{z1} 为

$$\begin{cases} v_{x1} = v_{x0} \\ v_{z1} = gt_1 \end{cases} \tag{8}$$

种子与斜面发生正碰撞，仅受法向力 F_N 作用，据文献[28]研究，其值为 3.5 N，作用时间 Δt 为 10^{-3} s，动量定理公式为

$$F_N \Delta t = m\Delta v \tag{9}$$

碰撞后速度沿斜面法向反弹，法向为斜面垂线方向，种子与排种器出种口斜面撞击后沿 X 轴和 Z 轴的速度 v_{x2} 和 v_{z2} 为

$$\begin{cases} v_{x2} = v_{x1}\cos(2\alpha) - v_{z1}\sin(2\alpha) \\ v_{z2} = v_{x1}\sin(2\alpha) + v_{z1}\cos(2\alpha) \end{cases} \tag{10}$$

(2)滑行段：出种口斜面至上分散板

种子撞击斜面后，以速度(v_{x2}，0，v_{z2})运动，X、Y 轴方向无外力作用，做匀速运动，Z 轴仅受重力作用，作自由落体运动。轨迹方程为

$$\begin{cases} X_2 = X_1 + v_{x2}t_2 \\ Y_2 = Y_0 \\ Z_2 = Z_1 + v_{z2}t_2 + 0.5gt_2^2 \end{cases} \tag{11}$$

式中　X_2——上分散板撞击点在绝对坐标系 X 轴坐标

Y_2——上分散板撞击点在绝对坐标系 Y 轴坐标

Z_2——上分散板撞击点在绝对坐标系 Z 轴坐标

t_2——种子从斜面到上分散板运动时间，s

将式(11)代入式(4)，整理后得到 t_2，将 t_2 代入式(11)获得种子在撞击点坐标(X_2，Y_2，Z_2)，种子撞击分散板之前在 X、Y、Z 轴方向上的瞬时速度为

$$\begin{cases} v_{x3} = v_{x2} \\ v_{y3} = v_{y2} \\ v_{z3} = v_{z2} + gt_2 \end{cases} \tag{12}$$

式中　v_{x3}——种子与上分散板撞击前在 X 方向上的瞬时速度分量，m/s

v_{y3}——种子与上分散板撞击前在 Y 轴方向上的瞬时速度分量，m/s

v_{z3}——种子与上分散板撞击前在 Z 轴方向上的瞬时速度分量，m/s

种子与上分散板撞击时，受到的反作用力方向为撞击点在上分散板上的沿法向量方向，其碰撞前后各速度分量为

$$\begin{cases} v_{n1} = v_3\boldsymbol{n} \\ v_{t1} = v_3 - v_{n1}\boldsymbol{n} \\ v_{t1} = v_{t2} \\ v_{n2} = -v_{n1} \\ v_4 = v_{t1} + v_{n2}\boldsymbol{n} \end{cases} \tag{13}$$

式中　v_3——碰撞前速度，m/s

v_{n1}——碰撞前法向速度分量，m/s

v_{t1}——碰撞前切向速度分量，m/s

$\boldsymbol{n}$——单位法向量

v_{t2}——碰撞后切向速度分量，m/s

v_{n2}——碰撞后法向速度分量，m/s

v_4——碰撞后速度分量，m/s

则碰撞后速度分量为

$$\begin{cases} v_{x4} = v_{x3} - 2v_{n1}n_x \\ v_{y4} = v_{y3} - 2v_{n1}n_y \\ v_{z4} = v_{z3} - 2v_{n1}n_z \end{cases} \tag{14}$$

式中　v_{x4}——种子碰撞上分散板后沿 X 轴速度分量，m/s

v_{y4}——种子碰撞上分散板后沿 Y 轴速度分量，m/s

v_{z4}——种子碰撞上分散板后沿 Z 轴速度分量，m/s

n_x——种子与上分散板撞击点的法向量在 X 轴方向上分量

n_y——种子与上分散板撞击点的法向量在 Y 轴方向上分量

n_z——种子与上分散板撞击点的法向量在 Z 轴方向上分量

n_x、n_y和 n_z分别为方向向量 $\boldsymbol{n}$ 在各轴的分量，分别为上分散板空间曲面方程对 X、Y 与 Z 的偏导。

(3)反弹段：上分散板至下分散板

种子撞击上分散板后，种子以速度(v_{x4}，v_{y4}，v_{z4})向斜下方运动，X、Y 轴方向为匀速运动，Z 轴方向自由落体，轨迹方程为

$$\begin{cases} X_3 = X_2 + v_{x4}t_3 \\ Y_3 = Y_2 + v_{y4}t_3 \\ Z_3 = Z_2 + v_{z4}t_3 + \dfrac{1}{2}gt_3^2 \end{cases} \tag{15}$$

式中　X_3——下分散板撞击点在绝对坐标系 X 轴坐标

Y_3——下分散板撞击点在绝对坐标系 Y 轴坐标

Z_3——下分散板撞击点在绝对坐标系 Z 轴坐标

t_3——种子从上分散板到下分散板运动时间，s

将式(15)代入式(5)，整理后得到 t_3，将 t_3 代入式(15)得到种子在撞击点的坐标(X_3，Y_3，Z_3)，同时得到种子撞击下分散板之前在 X、Y、Z 轴方向瞬时速度为

$$\begin{cases} v_{x5} = v_{x4} \\ v_{y5} = v_{y4} \\ v_{z5} = v_{z4} + gt_3 \end{cases} \tag{16}$$

式中 v_{x5}——种子与下分散板撞击前在 X 轴方向上的瞬时速度分量，m/s

v_{y5}——种子与下分散板撞击前在 Y 轴方向上的瞬时速度分量，m/s

v_{z5}——种子与下分散板撞击前在 Z 轴方向上的瞬时速度分量，m/s

同滑行段轨迹一样，可求得种子与下分散板撞击后的合速度 v_6，在 X、Y 与 Z 轴方向分速度 v_{x6}、v_{y6} 与 v_{z6}。

(4)跌落段：下分散板至某一平行监测通道

种子撞击下分散板后，种子以速度(v_{x6}，v_{y6}，v_{z6})做空间斜抛运动，直至 Z 轴坐标降至 0，即种子到达平行监测通道表面，Y 轴坐标决定进入的通道序号，运动方程为

$$\begin{cases} X_4 = X_3 + v_{x6}t_4 \\ Y_4 = Y_3 + v_{y6}t_4 \\ Z_4 = Z_3 + v_{z6}t_4 + \dfrac{1}{2}gt_4^2 \end{cases} \tag{17}$$

式中 X_4——种子进入某一平行监测通道在绝对坐标系中 X 轴的坐标

Y_4——种子进入某一平行监测通道在绝对坐标系中 Y 轴的坐标

Z_4——种子进入某一平行监测通道在绝对坐标系中 Z 轴的坐标

t_4——种子从下分散板到某一平行监测通道的运动时间，s

因坐标系与平行监测通道表面相固定，故当种子进入某一通道的瞬间，Z 轴坐标为 0，将 $Z_4=0$ 代入式(17)得到 t_4，将 t_4 代入式(17)，可知种子在 Y 轴方向最终分散位置为

$$Y_5 = Y_4 + v_{y6}\frac{-v_{z6} \pm \sqrt{v_{z6}^2 - 2gZ_4}}{g} \tag{18}$$

式中 Y_5——种子最终在绝对坐标系中 Y 轴的坐标

种子在 Y 轴终止坐标 Y_5 决定其监测通道编号。曲面形状(半径、倾角、板间距)通过影响碰撞法向量、速度分解及 Y 轴位移，最终影响通道分配均匀性。

通过以上分析，结合装置的体积和可供安装的位置，上分散板倾角取值范围为 0°～30°，当倾角大于 30°时，种子从排种舌抛出后，其速度分量(v_{x2}，v_{z2})较小，因此法向量过倾，易致种子滑出板面范围；当倾角为 0°时，虽 $v_{y4}\approx0$，但依赖下分散板碰撞仍可分散。上分散板半径取值范围 0～90 mm，受装置限制上分散板半径取值应不大于 90 mm，当取值为 90 mm 时，法向量平缓，均匀性略降但防逸出；当取值为 0 mm 时镜面反射仍可产生 Y 向速度。下分散板倾角取值范围为 0°～30°，当取值大于 30°时易反弹出通道；当取值 0°时可延长滑行时间，增大粒间隙，符合“断续流”目标。下分散板半径取值范围为 0～90 mm，理由同上分散板半径取值范围。两分散板的垂直距离取值范围为 4～36 mm，当取值小于 4 mm 时，两板会出现机械干涉；由于装置的高度限制，垂直距离应小于 36 mm，减小距离虽缩短自由落体时间 t_3，但可通过降倾角补偿 Y 轴位移。由于装置大小的限制，两分散板水平距离定为 75 mm。

2.2 分散装置设计

如图 6 所示，分隔板将分散装置分割为左、右 2 部分，左、右 2 部分各有 1 块上、下分散板，2 块上分散板和 2 块下分散板呈对称分布。为确保高频率种子流进入入种口后能更好均匀地分散到 8 条监测通道内，采取“先聚合，再分流，再分散”的设计思路，综合考虑安装限制条件和各参数取值范围，设计斜圆柱通道直径 D 为 38 mm，高度 h_1 为 32 mm，倾角 φ 为 30°，分隔板上端嵌在斜圆柱通道内，上端高度与倾角同斜圆柱通道一样，分隔板下端向下延伸，下端高度 h_2 为 50 mm，长度 l_2 为 85 mm。

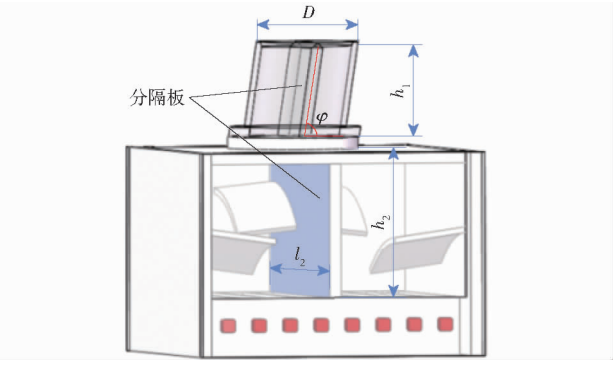


图 6 分散装置

Fig. 6 Dispersion device

2.3 平行通道设计

分散装置将种子流均匀分散后，其输出列对应

8 条独立监测路径。为精确捕获每条路径的种子流信息，设计平行通道，每条通道均独立设置对射式红外光电传感器实时识别和计数通过该通道的种子粒数。如图 7 所示，为规避多粒种子在平行通道宽度方向上并排落入同一通道的情况，沿通道宽度分成 8 个等间距的单通道，单个通道宽度设计需满足大于种子平均长度且不显著超过种子平均宽度 2 倍的约束条件。本研究种子样本的平均长度与宽度分别为 6.33 mm 和 3.82 mm，据此确定每一监测通道宽度 A 为 7 mm，总宽度 B 为 88 mm，总长度 L 为 80 mm，总高度 H 为 20 mm，且每一隔板实行 60°倒角处理。此外，左右两边各预留安装对射式红外传感器宽度 10 mm，激光射线宽度选取 3 mm，可避免因种子无法完全遮蔽光线而导致监测信号缺失情况。

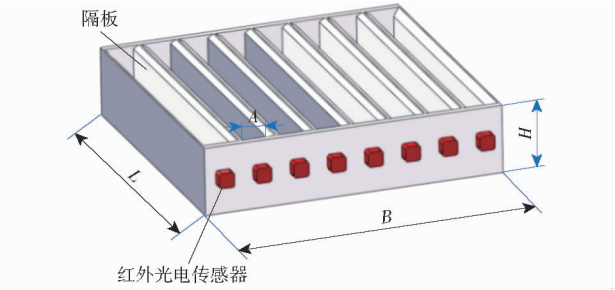


图 7　平行通道装置

Fig. 7　Parallel channel structure

2.4　信号监测系统设计

信号监测系统硬件包括对射式红外光电传感器组、信号处理电路、微控制器 STM32F103C8T6 单片机、显示屏和连接线缆；软件运行于 STM32F103C8T6 单片机，包括初始化模块、中断计数模块和显示模块。

2.4.1　信号监测流程

经过处理的 8 路小麦种子流信号分别接入 STM32F103C8T6 单片机的 8 个引脚（A0、A1、A2、A3、A6、A7、B0、B1）。其中，A0、A1、A2 和 A3 作为定时器 T2 的捕获中断源，A6、A7、B0 和 B1 作为定时器 T3 的捕获中断源。当种子通过监测通道时，相应引脚产生电平变化触发中断，单片机通过中断服务程序对各通道种子计数并累计求和，实现种子数目的精确测量。系统软件架构包括系统初始化模块、中断计数模块和显示模块，各模块协同工作实现播种过程的实时监测与数据显示，监测软件流程图如图 8 所示。

2.4.2　信号处理电路设计

为设计 8 通道信号监测电路，需分析单通道种子信号，保障监测装置适应性。针对不同粒径小麦种子，设计宽适应性信号监测电路是关键。对射式

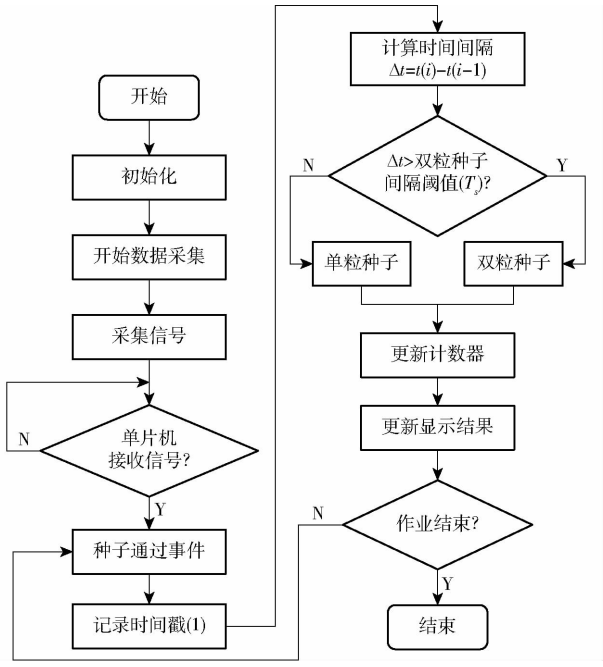


图 8　监测软件流程图

Fig. 8　Monitoring soft process flowchart

红外传感系统在自然光下工作，种子穿越红外感应区时，接收端光电流产生幅值、历时与粒径正相关的特征信号，该信号混有高频噪声，幅值 10 ~ 50 mV，需多级处理。单通道信号处理电路图如图 9 所示。

8 通道信号处理电路以最小粒径种子信号幅值为基准设计。信号先经 3 ~ 5 倍信号基频的 RC 低通滤波器抑制高频噪声，信噪比提升约 20 dB；再通过双级运算放大电路增强，首级同相放大匹配阻抗，次级仪表放大抑制共模干扰，整体放大 100 ~ 400 倍，使 10 mV 信号达到电压比较器 1 ~ 5 V 阈值。放大信号经锗二极管半波整流，保留正向脉冲。整流信号输入迟滞电压比较器，设定 0.5 ~ 2.5 V 阈值与 200 ~ 300 mV 回差电压，转换为数字方波。最后经单稳态触发电路，输出 5 V TTL 电平，脉宽可控的标准方波，满足单片机中断触发要求。

3　分散装置参数优化

3.1　离散元仿真平台搭建

离散元法适用于分析散粒体与农机部件的相互作用，采用 EDEM 软件仿真小麦种子与分散板的碰撞过程，以预测种子在装置内的运动轨迹及最终落入各平行通道的分布情况。在此基础上，以各平行通道落种数目的变异系数为评价指标，对分散装置的关键参数进行仿真优化。

小麦种子表面光滑、流动性好，近似椭球体（长、短轴表征）。选用新冬 60 小麦，实测 100 粒三轴尺寸平均值为长 6.33 mm、宽 3.82 mm、高 3.34 mm。为精确建模，将小麦种子简化为 9 个球

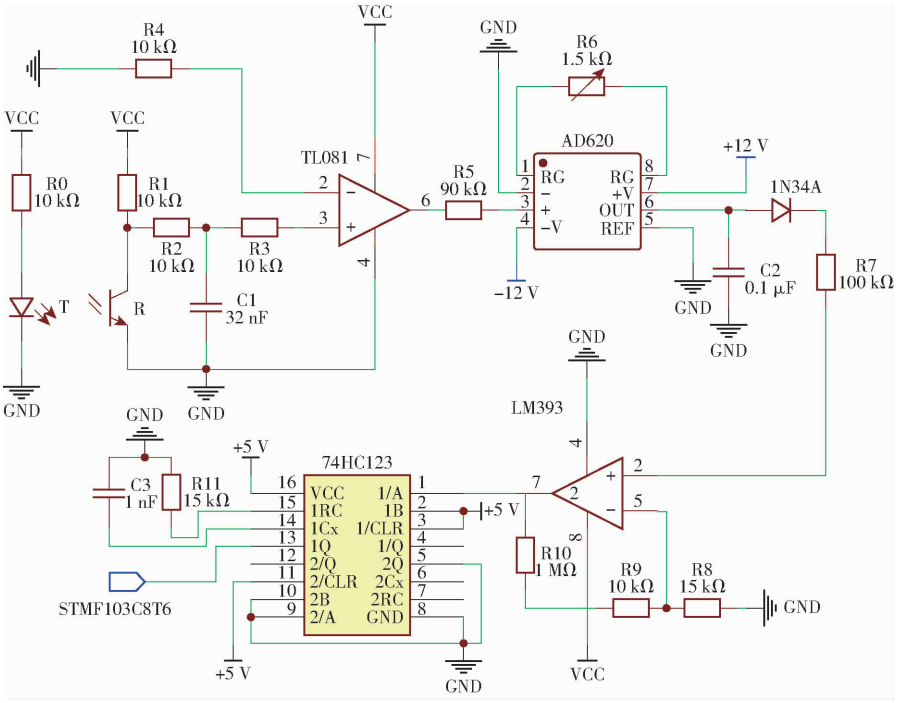


图 9 单通道信号处理电路图

Fig. 9 Single-channel signal processing circuit diagram

体组合的颗粒模型,如图 10 所示。

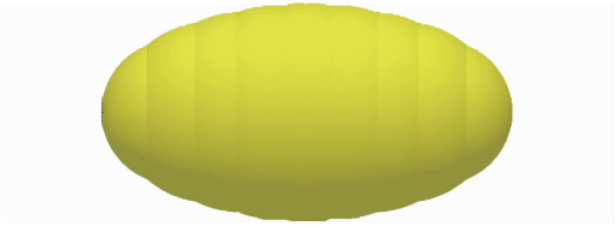


图 10 小麦种子离散元模型

Fig. 10 Discrete element model of wheat seeds

小麦种子之间不需考虑由于流体黏性产生的压力和阻力,单纯是由法向与切向的相对运动产生种子之间的接触力和局部变形,故小麦种子之间、小麦种子与分散装置之间的接触模型设为 Hertz - Mindlin 模型[29]。

分散装置与平行通道采用 3D 打印制造,材料为 PLA。通过查阅文献[30],确定小麦种子和监测装置材料力学特性参数、小麦种子与分散板之间和小麦种子之间的静摩擦因数、滚动摩擦因数与恢复系数,如表 1 所示。

应用 Solidworks 构建完整的分散装置工作仿真模型,主要包括分散装置和平行通道,整体仿真模型如图 11 所示。

为方便对小麦种子在各监测通道的分布均匀情况分析,在平行通道的 8 个单通道中分别设置 1 个网格,共 8 个,测量各通道下落种子数量。

3.2 分散装置性能检测

为检测出分散装置在 EDEM 中仿真作业过程

表 1 材料力学特性参数设置

Tab. 1 Settings of material mechanical properties parameters

参数		小麦种子	分散板
剪切模量/MPa		8.68×10^{6}	1.02×10^{8}
泊松比		0.40	0.40
密度/(kg·m^{-3})		8.10×10^{2}	1.15×10^{3}
静摩擦因数	种子-种子	0.58	
	种子-分散板	0.55	
滚动摩擦因数	种子-种子	0.01	
	种子-分散板	0.01	
弹性恢复系数	种子-种子	0.50	
	种子-分散板	0.50	

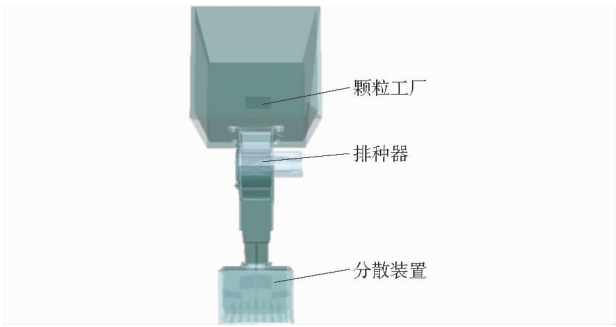


图 11 分散装置工作仿真模型

Fig. 11 Simulation model of dispersion device operation

中不同参数的分散效果,需对分散装置分散性能进行测定。以分散均匀性变异系数为评价指标,定义分散装置性能优异。

在平行通道装置中设置 Grid Bin Group,添加 8 个网格作为小麦分散均匀性的数据测量区域,在仿

真试验结束后，统计每个网格中种子数量，计算分散均匀性变异系数公式为

$$Q = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \tag{19}$$

其中

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

式中　Q——小麦种子数目分散均匀性变异系数，%

$\bar{x}$——全部网格内平均种子数，粒

x_i——第 i 个网格内种子数，粒

n——网格数，个

s——小麦种子数标准差，粒

选择分散均匀性变异系数 Q 作为评价指标验证分散装置的分散性能，Q 越小说明分散效果越佳，同时还可验证不同参数的分散装置分散效果。设置仿真工作时长 6.5 s，播种量分别为 225、300、375 kg/hm^2，对应排种器转速为 13、17、21 r/min。

3.3　分散装置参数优化试验

3.3.1　单分散板装置参数优化试验

由理论分析可知，上分散板倾角、半径及上分散板的最低点位置均对分散效果产生影响，而上分散板的最低点位置由种流密度最大的空间确定，故将上分散板半径与上分散板倾角作为关键参数进行优化。

设计单因素试验确定上分散板半径和倾角的取值范围。上分散板半径从 0 mm 逐渐增大到 90 mm，每次扩大 15 mm；倾角从 0°增大到 30°，每次扩大 5°，每组试验重复 3 次，取平均值，试验结果如图 12 所示。

由图 12a 可知，在不同播量下，分散均匀性变异系数随上分散半径的增大呈现先减小后增大的趋势，当半径达到 45 mm 时，分散均匀性变异系数最低。由图 12b 可知，不同播量下分散均匀性变异系数随上分散倾角增大呈现先减小后增大，当倾角为 5°时，分散均匀性变异系数最低。

在单因素试验基础上，进行上分散板装置参数优化试验，上分散板半径为 40 ~ 60 mm，上分散板倾角为 0° ~ 10°。以分散均匀性变异系数为评价指标，开展两因素响应面中心复合设计试验，试验因素编码如表 2 所示，试验结果如表 3 所示。

由表 3 数据，经方差分析可得到，模型 P 为 0.000 3，表示该预测模型极显著。分散均匀性变异系数模型为

$$Q = -3.46X_1 - 3.59X_2 + 4.59X_1X_2 + 17.06X_1^2 + 6.8X_2^2 + 4.54X_1^2X_2 - 2.12X_1X_2^2 + 25.29 \tag{20}$$

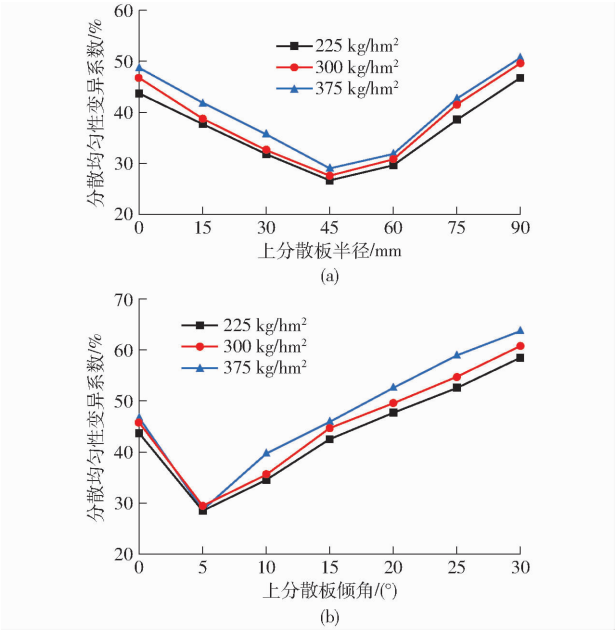


图 12　单因素与单分散板装置分散性能的关系

Fig. 12　Relationship between single factor and dispersion performance of single dispersed plate structure

表 2　中心复合设计试验编码

Tab. 2　Response surface test level values for parameter optimization of upper dispersion plate

因素	编码				
	−1.414	−1	0	1	1.414
半径/mm	40.00	42.93	50.00	57.07	60.00
倾角/(°)	0	1.46	5.00	8.54	10.00

表 3　上分散板参数优化试验结果

Tab. 3　Results of response surface experiment for optimization of upper dispersal plate parameters

因素		分散均匀性变异系数均值/%
半径 X_1	倾角 X_2	
0	0	25.39
−1	−1	58.52
1	1	49.27
1.414	0	33.68
0	−1.414	64.17
−1.414	0	43.82
−1	1	38.17
0	0	24.96
0	0	25.52
0	1.414	54.38
1	−1	51.24

由 Design-Expert 13 软件优化得到半径与倾角分别为 52.70 mm 与 5.41°，此时分散均匀性变异系数为 25.23%。

3.3.2　双分散板装置参数优化试验

在保持上分散板参数优化结果基础上，探究当种流在两分散板上连续碰撞后种流分散均匀度，对

双分散板装置进行参数优化。

(1)单因素试验

由于监测装置宽度限制,两分散板水平距离取 80 mm。对下分散板半径、下分散板倾角与两分散板间的垂直距离进行单因素试验,缩小优化试验取值范围。下分散板半径从 0 mm 逐渐增大到 90 mm,每次扩大 15 mm;倾角从 0°增大到 30°,每次扩大 5°;两分散板垂直距离从 8 mm 到 32 mm,每次增大 4 mm。每组试验重复 3 次,取平均值,单因素试验结果如图 13 所示。

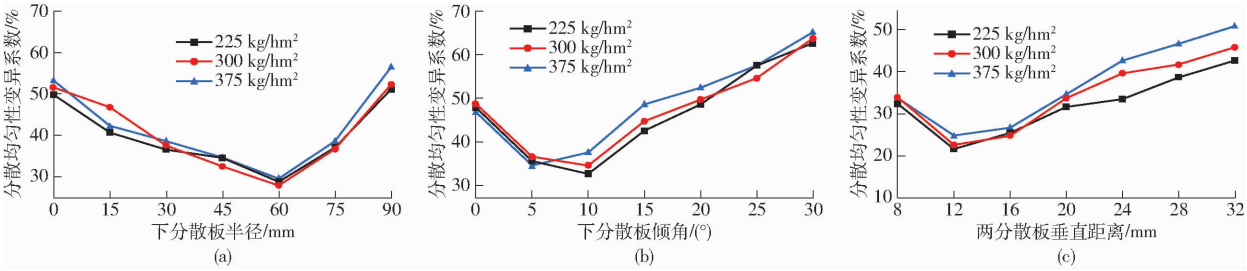


图 13 单因素与双分散板装置分散性能的关系

Fig. 13 Relationship between single factor and dispersion performance of dual-dispersed plate structure

由图 13a 可知,在不同播量下,分散均匀性变异系数随下分散半径的增大呈现先减小后增大的趋势,当下分散板半径达到 60 mm 时,分散均匀性变异系数最低。由图 13b 可知,不同播量下的分散均匀性变异系数随下分散倾角的增大呈现先减小后增大,当下分散板倾角为 10°附近时,分散均匀性变异系数最低。由图 13c 可知,不同播量下,随着两分散板垂直距离的逐渐增加,分散均匀性变异系数先下降而后增加,在两分散板垂直距离为 12 mm 附近时,分散均匀性变异系数降至最低。

(2)三因素试验

在单因素试验的基础上,开展双分散板装置参数优化响应面试验。采用 Design-Expert 13 的 Box-Behken 模块设计三因素三水平试验,各因素编码如表 4 所示,试验结果如表 5 所示。

表 4 双分散板参数优化试验因素编码

Tab. 4 Factors and levels of optimization experiment for dual-dispersion plates parameters

编码	因素		
	半径/mm	倾角/(°)	两分散板垂直距离/mm
-1	60	5.0	12
0	65	7.5	14
1	70	10.0	16

(3)方差分析

对表 5 仿真的试验结果进行处理和分析,得到分散均匀性变异系数的方差分析结果如表 6 所示。分散均匀性变异系数的回归模型的 $P<0.0001$,说明所选取自变量因素对分散均匀性有极显著影响,而且失拟值大于 0.05,说明失拟项不显著;且各试验因素对分散均匀性变异系数的影响由大到小为 B、A、C。根据分析结果对分散均匀性变异系数

表 5 双分散板参数优化试验结果

Tab. 5 Experiment results of optimization for dual-dispersion plates parameters

试验序号	因素			分数均匀性变异系数 Q/%
	半径 A	倾角 B	两板垂直距离 C	
1	0	0	0	20.84
2	0	0	0	21.24
3	0	1	-1	43.14
4	0	-1	1	42.83
5	1	1	0	53.41
6	1	-1	0	49.87
7	0	0	0	21.67
8	1	0	-1	29.38
9	0	0	0	21.32
10	-1	-1	0	51.45
11	0	-1	-1	43.38
12	-1	1	0	50.21
13	-1	0	1	29.47
14	0	0	0	20.43
15	-1	0	-1	30.54
16	1	0	1	32.12
17	0	1	1	44.71

表 6 回归模型方差分析

Tab. 6 Variance analysis of regression mode

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
分散均匀性变异系数	模型	2 403.23	9	267.03	1 834.73	<0.000 1
	A	1.21	1	1.21	8.31	0.023 6
	B	1.94	1	1.94	13.33	0.008 2
	C	0.90	1	0.90	6.21	0.041 4
	AB	5.71	1	5.71	39.25	0.000 4
	AC	3.63	1	3.63	24.94	0.001 6
	BC	1.12	1	1.12	7.72	0.027 4
	A^2	304.12	1	304.12	2 089.61	<0.000 1
	B^2	1 971.06	1	1 971.06	13 543.16	<0.000 1
	C^2	2.55	1	2.55	17.54	<0.000 1
	残差	1.02	7	0.145 5		
	失拟值	0.109 4	3	0.036 5	0.160 4	0.917 7
	误差	0.909 4	4	0.227 4		
	总和	2 404.25	16			

进行多元回归拟合，得各因素对分散均匀性变异系数影响的回归方程为

$$Q = 0.39A + 0.49B + 0.33C + 1.19AB + 0.95AC + 0.53BC + 8.50A^2 + 21.64B^2 + 0.78C^2 + 21.10 \quad (21)$$

(4)响应曲面分析

使用 Design-Expert 13 分析因素交互作用对分散均匀性变异系数的影响，响应曲面见图 14。结果表明变异系数随下分散板倾角增大呈先降后升趋势，在约 7.5°处最低；变异系数随下分散板半径增大呈先降后升趋势，在约 65 mm 处最低；变异系数随两板垂直距离增大略微呈先降后升趋势。

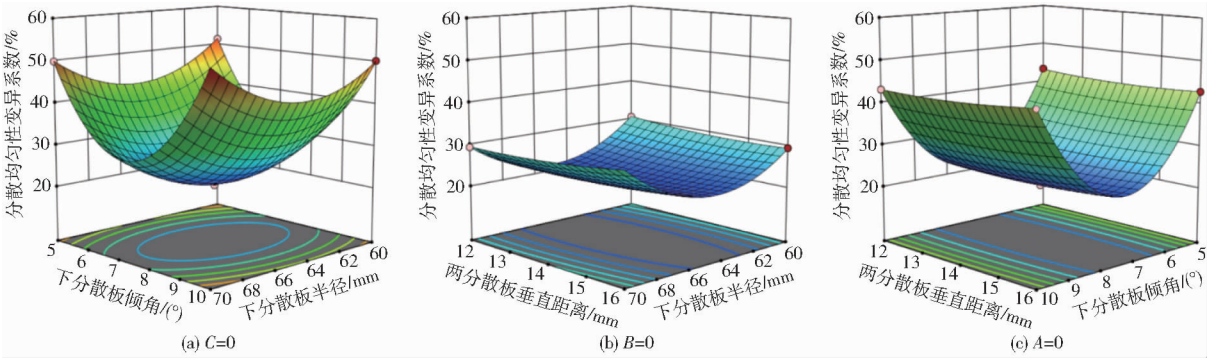


图 14　试验因素交互作用对指标影响的响应曲面

Fig. 14　Response surfaces of interaction effect of experimental factors on index

(5)参数优化

为寻求分散装置最优分散效能工作状态，利用 Design-Exper 13 Optimization 模块对分散均匀性变异系数进行寻优处理，其优化目标为寻求试验指标的最小值，寻优范围为各试验因素最小以及最大值，优化模型为

$$\begin{cases} \min Q \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

获得最佳因素组合为下分散板半径 64.95 mm、下分散板倾角 7.48°和两分散板垂直距离 13.59 mm，此时分散均匀性变异系数为 21.06%。

4　播量监测装置性能验证试验

根据理论分析及仿真试验确定了分散装置参数，使用 3D 打印以及集成监测电路处理完成高频率小麦种子流播量监测装置。为验证仿真参数模型的准确性以及播量监测精度，开展台架验证试验。选取新冬 60 号小麦种子作为试验材料，台架试验如图 15 所示。控制外槽轮转速将播量分别设置在 225、300、375 kg/hm^2，每个播量测试 3 次，每次排种 50 g，分别对 8 个通道内的种子数量进行人工计数。

4.1　分散均匀性试验结果

根据台架试验获取的试验数据，并计算分散均匀性变异系数，结果如图 16 所示。由图 16 可知，在不同播种量下分散均匀性变异系数不高于 21.94%，与理论优化值 21.06%相对误差小于 5%。

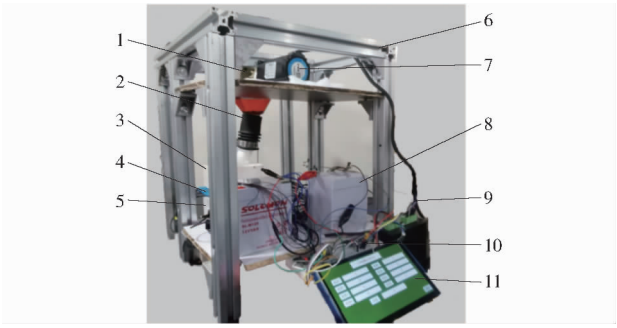


图 15　高频率小麦播量监测装置台架试验

Fig. 15　Platform test of high-frequency monitoring device for wheat sowing quantity

1. 排种器　2. 导种管　3. 高频率小麦播量监测装置　4. 对射式红外光电传感器组　5. 接种装置　6. 台架　7. 步进电机　8. 蓄电池　9. 电机驱动器　10. 单片机　11. 显示屏

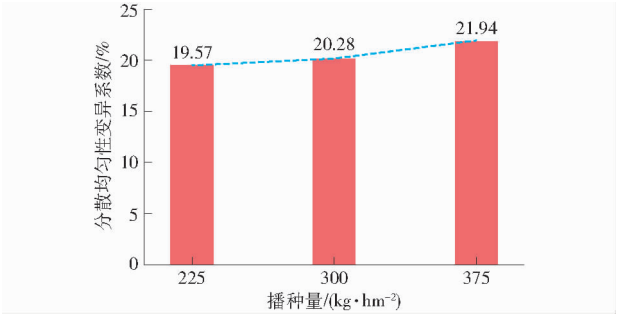


图 16　不同播量对分散均匀性变异系数的影响

Fig. 16　Influence of different seeding rates on coefficient of variation of dispersion uniformity

4.2　监测精度试验结果

观察上位机显示的种子监测数量，比较实际种子数量和监测的种子数量，得到监测精度，结果如图 17 所示。

由图 17 可知，随着播种量增加，监测值偏差增大，当播量 375 kg/hm^{2}时，精度为 82.50%。漏测原

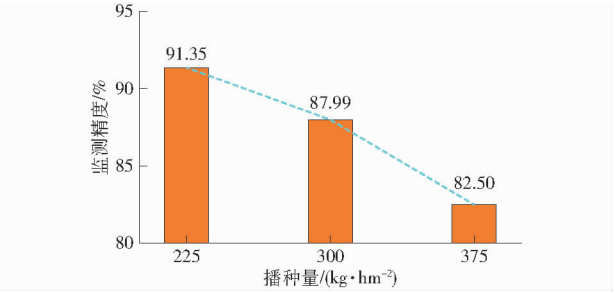


图 17 不同播量对监测精度的影响

Fig. 17 Influence of different seeding rates on monitoring accuracy

因为监测通道与排种舌出口对位不准,导致种子分布不均,特定通道流量超限,漏检概率增加;经分散后,仍存在多粒种子共线重叠通过光线截面,被误判为单粒;部分小麦尺寸小于传感器光线直径,无法触发有效信号。

为提高精度,采用监测值补偿法[31],需建立监测值与实际值关系(即不同播量下监测差值)。基于试验数据,利用 Matlab 2022 拟合监测差值,得到补偿曲线如图 18 所示。

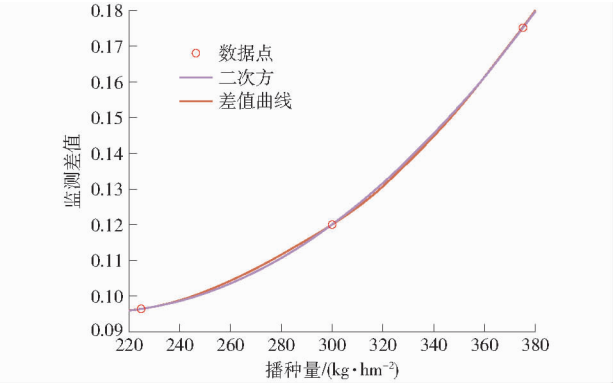


图 18 不同播量对应监测差值拟合曲线

Fig. 18 Fitting curves of monitoring differences corresponding to different sowing rates

监测差值拟合方程为

$$y = 2.782 \times 10^{-6}x^2 - 0.001\,146x + 0.213\,5 \quad (23)$$

在不同播种量下将差值拟合方程加入种子计数逻辑,在每个不同播种量下,重复试验 3 次,结果如图 19 所示。由图 19 可知,在加入补偿后,监测精度在不同播种量下皆有提高,播量为 375 kg/hm^{2}时,监测精度为 95.34%。

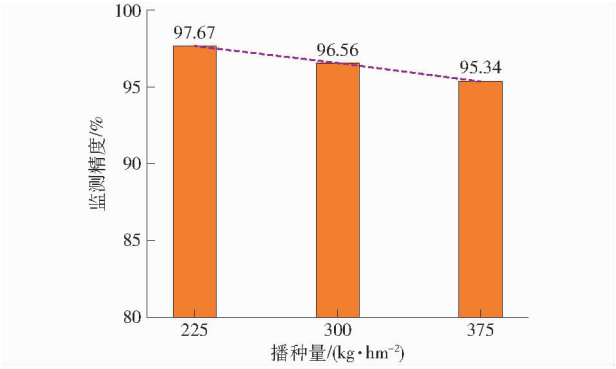


图 19 加入补偿后不同播量对监测精度的影响

Fig. 19 Impact of different seeding rates after adding compensation on monitoring accuracy

5 结论

(1)针对大播量、高频排种导致的小麦种子流监测精度不足问题,设计了一种基于分散机制与对射式红外光电传感的播量监测装置,并确定了其基本参数。

(2)基于运动学分析揭示了种子在分散装置中运动轨迹及可分散性,确定了影响分散均匀性的关键装置参数及其取值范围;设计了包含弱信号放大、抗干扰整形和单片机精准计数的 8 通道信号处理电路与监测方法。

(3)利用 EDEM 仿真软件建立了模拟种子流在分散装置运动过程仿真试验平台,以分散均匀性变异系数为评价指标,进行分散装置参数优化试验,得到最优分散性能参数为上分散板半径 52.70 mm、上分散板倾角 5.41°、下分散板半径 64.95 mm、下分散板倾角 7.48°及两分散板垂直距离 13.59 mm。

(4)对监测装置的性能进行台架验证试验,结果表明,在最优参数条件下,不同播量的分散均匀性变异系数为不高于 21.94%,与仿真试验结果相对误差小于 5%,具有良好的分散均匀性。加入补偿后,不同播量的监测精度不低于 95.34%,具有良好的监测精度。该监测装置可为小麦高效精量匀播技术的播量监测提供技术支持。

参 考 文 献

[1] 黄麒. 我国小麦生产现状及发展对策[J]. 河南农业,2025(1):52 - 54.

[2] 徐春保,刘靖怡,苏清茂,等. 薄面光折射式小麦种子流多通道并行检测装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(18):81 - 91.
XU Chunbao, LIU Jingyi, SU Qingmao, et al. Design and experiment of the wheat seed flow multi-channel parallel detection device with thin-surface light refraction[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(18): 81 - 91. (in Chinese)

[3] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报,2017,48(9):1 - 16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):1 - 16. (in Chinese)

[4] KUMAR R, RAHEMAN H. Detection of flow of seeds in the seed delivery tube and choking of boot of a seed drill[J].

Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153:266 - 277.
[5] MC Electronics. Sistema full semina [EB/OL]. (2018 - 04 - 11) [2025 - 05 - 08]. https://www.mcelettronica.it/it/prodotti/semina/semina-di-precisione/full-semina_272c28.html.
[6] John Deere. Monitoring and documentation [EB/OL]. (2015 - 08 - 04) [2025 - 05 - 08]. http://www.deere.com/en_US/pars/parts_by_industry/ag/seeding/monitoring/monitoring.page.
[7] Planting Precision. Wave vision[EB/OL]. (2014 - 07 - 15) [2025 - 05 - 08]. https://www.precisionplanting.com/Products/product/wave vision.
[8] 刘伟. 基于排种流量信息的小麦播种机播种量监测调控技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2020.
LIU Wei. Research on monitoring and control technology of sowing quantity for wheat sowing machine based on sowing flow information [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020. (in Chinese)
[9] 赵立新,张增辉,王成义,等. 基于变距光电传感器的小麦精播施肥一体机监测系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(13):27 - 34.
ZHAO Lixin, ZHANG Zenghui, WANG Chengyi, et al. Design of monitoring system for wheat precision seeding-fertilizing machine based on variable distance photoelectric sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 27 - 34. (in Chinese)
[10] 郝向泽,何旭鹏,邹翌,等. 基于光电传感器的精密播种机排种性能监测系统的研究[J]. 华南农业大学学报,2017,38(1):120 - 124.
HAO Xiangze, HE Xupeng, ZOU Yi, et al. Research on a precision seed dispensing performance monitoring system for seeders based on photoelectric sensors [J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(1): 120 - 124. (in Chinese)
[11] 车宇,伟利国,刘婷韬,等. 免耕播种机播种质量红外监测系统设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(增刊 1):11 - 16.
CHE Yu, WEI Liguo, LIU Xingtao, et al. Design and experiment of seeding quality infrared monitoring system for no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 11 - 16. (in Chinese)
[12] 朱瑞祥,葛世强,翟长远,等. 大籽粒作物漏播自补种装置设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(21):1 - 8.
ZHU Ruixiang, GE Shiqiang, ZHAI Changyuan, et al. Design and experiment of automatic reseeding device for miss-seeding of crops with large grain[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 1 - 8. (in Chinese)
[13] 丁幼春,杨军强,朱凯,等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2017, 33(9):29 - 36.
DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29 - 36. (in Chinese)
[14] 丁幼春,张莉莉,杨军强, 等. 油菜精量直播机播种监测系统传感装置改进及通信设计[J].农业工程学报, 2018,34(14):19 - 26.
DING Youchun, ZHANG Lili, YANG Junqiang, et al. Sensing device improvement and communication design on sowing monitoring system of precision planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 19 - 26. (in Chinese)
[15] 丁幼春,王凯阳,杜超群,等. 高通量小粒径种子流检测装置设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(13):20 - 28.
DING Youchun, WANG Kaiyang, DU Chaoqun, et al. Design and experiment of high-flux small-size seed flow detection device[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 20 - 28. (in Chinese)
[16] 贾洪雷,路云,齐江涛,等. 光电传感器结合旋转编码器检测气吸式排种器吸种性能[J]. 农业工程学报,2018,34(19):28 - 39.
JIA Honglei, LU Yun, QI Jiangtao, et al. Detecting seed suction performance of air suction feeder by photoelectric sensor combined with rotary encoder[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 28 - 39. (in Chinese)
[17] 黄东岩,贾洪雷,祁悦,等. 基于聚偏二氟乙烯压电薄膜的播种机排种监测系统[J]. 农业工程学报,2013,29(23):15 - 22.
HUANG Dongyan, JIA Honglei, QI Yue, et al. Seeding monitor system for planter based on polyvinylidence fluoride piezoelectric film[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 15 - 22. (in Chinese)
[18] 纪超,陈学庚,陈金成,等. 玉米免耕精量播种机排种质量监测系统[J].农业机械学报,2016,47(8):1 - 6.
JI Chao, CHEN Xuegeng, CHEN Jincheng, et al. Monitoring system for working performance of no-tillage corn precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 1 - 6. (in Chinese)
[19] 徐洛川,胡斌,罗昕,等. 叉指电容式棉花穴播取种状态监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 50 - 60.
XU Luochuan, HU Bin, LUO Xin, et al. Development of a seeding state monitoring system using interdigital capacitor for cotton seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 50 - 60. (in Chinese)
[20] 刘志壮,吕贵勇.基于电容法的稻谷含水率检测[J].农业机械学报,2013,44(7):179 - 182.
LIU Zhizhuang, LÜ Guiyong. Moisture content detection of paddy rice based on capacitance approach [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 179 - 182. (in Chinese)
[21] 周利明,王书茂,张小超,等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报,2012,28(13):16 - 21.
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 16 - 21. (in Chinese)
[22] 周利明,季雨希,牛康,等. 基于电容法的齿盘式棉花穴播器播种量传感器设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(增刊 1):177 - 185.
ZHOU Liming, JI Yuxi, NIU Kang, et al. Design and experiment of seeding quantity sensor for cotton hill-drop planters based on capacitive method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 177 - 185. (in Chinese)
[23] 王云霞,黄苏同,张文毅,等. 交错勾齿式小麦精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(7):142 - 153,167.
WANG Yunxia, HUANG Sutong, ZHANG Wenyi, et al. Design and experiment of wheat precision seed metering device with staggered hook-tooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 142 - 153,167. (in Chinese)

(下转第 142 页)

DONG Zhongyan, JIANG Lixing, WANG Junya, et al. Modified one-dimensional Otsu algorithm based on image complexity[J]. Computer Science, 2015, 42(Supp. 1): 171 - 174. (in Chinese)

[21] 苏伟,蒋坤萍,闫安,等. 基于无人机遥感影像的育种玉米垄数统计监测[J]. 农业工程学报,2018,34(10):92 - 98.
SU Wei, JIANG Kunping, YAN An, et al. Monitoring of planted lines for breeding corn using UAV remote sensing image[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 92 - 98. (in Chinese)

[22] 廖娟,汪鹞,尹俊楠,等. 基于分区域特征点聚类的秧苗行中心线提取[J]. 农业机械学报,2019,50(11):34 - 41.
LIAO Juan, WANG Yao, YIN Junnan, et al. Detection of seedling row centerlines based on sub-regional feature points clustering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 34 - 41. (in Chinese)

[23] TENHUNEN H, PAHIKKALA T, NEVALAINEN O, et al. Automatic detection of cereal rows by means of pattern recognition techniques[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 677 - 688.

[24] SCHOLKMANN F, BOSS J, WOLF M. An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals[J]. Algorithms, 2012, 5(4): 588 - 603.

[25] 司永胜,姜国权,刘刚,等. 基于最小二乘法的早期作物行中心线检测方法[J]. 农业机械学报,2010,41(7):163 - 167,185.

[26] ZHANG J, XU S, ZHAO Y, et al. Aerial orthoimage generation for UAV remote sensing[J]. Information Fusion, 2023, 89: 91 - 120.

[27] 罗锡文,胡炼,何杰,等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报,2024,40(1):1 - 16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1 - 16. (in Chinese)

[28] 张闻宇,胡力文,王辉,等. 基于 B 样条优化的改进纯追踪农机导航曲线跟踪方法[J]. 农业机械学报,2024,55(9):42 - 51,115.
ZHANG Wenyu, HU Liwen, WANG Hui, et al. Improved pure pursuit agricultural machinery navigation curve tracking method based on B-spline optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 42 - 51,115. (in Chinese)

(上接第 31 页)

[24] 兰玉彬,韩金钢,张同升,等. 正态分布规律变量调节式多功能条播装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(9):75 - 88.
LAN Yubin, HAN Jin'gang, ZHANG Tongsheng, et al. Design and testing of multifunctional strip-tillage device based on normal distribution regular variable conditioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 75 - 88. (in Chinese)

[25] 杨丽,李治民,张东兴,等. 离心式高速玉米精量排种器 T 形槽型孔设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(7):50 - 60.
YANG Li, LI Zhimin, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of the T-shaped hole of centrifugal high-speed maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 50 - 60. (in Chinese)

[26] 丁幼春,王凯阳,刘晓东,等. 中小粒径种子播种检测技术研究进展[J]. 农业工程学报,2021,37(8):30 - 41.
DING Youchun, WANG Kaiyang, LIU Xiaodong, et al. Research progress of seeding detection technology for medium and small- size seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(8): 30 - 41. (in Chinese)

[27] 王兴波. 空间任意方向圆柱面的参数方程[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版),2010,28(6):58 - 63.
WANG Xingbo. Parametric equations of arbitrary directional cylindrical surfaces in space [J]. Journal of Foshan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 28(6): 58 - 63. (in Chinese)

[28] 赵湛,李耀明,陈义,等. 水稻籽粒碰撞力学特性研究[J]. 农业机械学报,2013,44(6):88 - 92.
ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Yi, et al. Impact mechanical characteristics analysis of rice grain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 88 - 92. (in Chinese)

[29] 翟萌萌. 基于 EDEM 的小麦宽幅精量播种装置优化设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
ZHAI Mengmeng. Optimization design and experimental study of a wide-row precision sowing device for wheat based on EDEM [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[30] 谢建华,张洪梁,冯浩,等. 摩擦调节式小区小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(1):164 - 173.
XIE Jianhua, ZHANG Hongliang, FENG Hao, et al. Design and experiment of friction adjustable precision seed feeder device for wheat experimental sowing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 164 - 173. (in Chinese)

[31] 丁永前,陈冲,余洪锋,等. 小麦播种机播量控制参数自校正方法[J]. 农业机械学报,2023,54(4):31 - 37,275.
DING Yongqian, CHEN Chong, YU Hongfeng, et al. Self-correcting method for application rate control parameters of wheat seed drill machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 31 - 37,275. (in Chinese)