doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.013

稻麦兼用气送式播种机种箱余量监测系统设计与试验

黄子顺[1,2]　黄大明[1,2]　邹　果[1,2]　姚奕正[1,2]　李嘉琦[1,2]　臧　英[3,4]

(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;2.华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广州 510642;
3.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083;4.华南农业大学黄埔创新研究院,广州 510715)

摘要:针对稻麦兼用气送式播种机种箱余量及播量监测不准确,易导致播种机空转工作而未能进行有效播种的问题,本文设计了一种基于 *XY* 轴移动平台的激光扫描测距种箱余量监测系统,用于实时监测种箱内种子余量。通过分析种箱结构,基于切割法、近似法和积分法,采用激光测距传感器采集种箱种子余量三维数据,提出了梯形算法和辛普森算法计算种箱种子体积。通过台架试验比较了不同容积时梯形算法和辛普森算法的检测准确率,结果表明,当种子余量大于 142 L 时,辛普森算法检测绝对误差小于梯形算法;而当种子余量小于 142 L 时,梯形算法检测绝对误差小于辛普森算法,因此提出综合算法以减小监测误差;同时确定分割薄片数量 m 为 5。采用"综合算法和 $m=5$"方案时,监测系统绝对误差小于 4 L,完成一次监测的时间控制在 1.5 s 以内。田间播种试验结果表明,检测装置播种量最大监测误差为 1.03 kg,最大监测相对误差 8.26%。研究结果可为提高稻麦兼用气送式播种机播种性能提供指导。

关键词:播种机;气送式;种箱余量检测;稻麦兼用;激光测距

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0153-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Seed Box Residue Monitoring System for Pneumatic Conveying Rice – Wheat Seeder

HUANG Zishun[1,2]　HUANG Daming[1,2]　ZOU Guo[1,2]　YAO Yizheng[1,2]　LI Jiaqi[1,2]　ZANG Ying[3,4]

(1. *College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*
2. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*
3. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*
4. *Huangpu Innovation Research Institute, South China Agricultural University, Guangzhou* 510715, *China*)

Abstract: Aiming to address the issue of inaccurate monitoring of seed box level and sowing amount in pneumatic seeders suitable for both rice and wheat, which can lead to ineffective sowing due to idling operation, a laser scanning distance-based seed box level monitoring system was designed based on an *XY*-axis moving platform to monitor the remaining seed quantity in real time. By analyzing the structure of the seed box and using three-dimensional data collected by laser distance sensors based on slicing, approximation, and integration methods, trapezoidal and Simpson's algorithms were proposed to calculate the volume of seeds in the seed box. Bench tests were conducted to compare the accuracy of the trapezoidal and Simpson's algorithms at different volumes. Results showed that when the remaining seed volume was greater than 142 L, Simpson's algorithm had a smaller absolute error than the trapezoidal algorithm. When the remaining seed volume was less than 142 L, the trapezoidal algorithm performed better. Therefore, a comprehensive algorithm was proposed to reduce monitoring errors, and the number of sliced layers (m) was determined as 5. Using the comprehensive algorithm with $m=5$, the monitoring system achieved an absolute error of less than 4 L, and completed one monitoring cycle within 1.5 s. Field sowing experiments indicated that the maximum monitoring error of the sowing amount was 1.03 kg, with maximum relative error of 8.26%. The results can provide guidance for improving the sowing performance of pneumatic conveying rice – wheat seeder.

Key words: seeder; pneumatic conveying; seed box residue detection; rice – wheat dual-purpose; laser distance measurement

收稿日期:2025-06-29　修回日期:2025-07-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000403)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-01)

作者简介:黄子顺(1998—),男,博士生,主要从事水稻播种研究,E-mail:375529755@qq.com

通信作者:臧英(1973—),女,教授,博士,主要从事水稻精准种植技术与智能播种装备研究,E-mail:yingzang@scau.edu.cn

0 引言

水稻和小麦是我国两大重要粮食作物[1-2]，两者播种期毗邻，且播种工序相近[3-5]，研发稻麦兼用型气送集排式播种机可提高播种机利用率[6-8]。目前气送集排式播种机采用大种箱且后置于拖拉机[9]，农机手无法观察种箱种子余量易导致播种机空转而未能进行有效播种[10-11]；机械供种装置因排种轮转速快、种子结块和种子含有稻秆等原因导致排种轮充种不充分[12]，使得排种轮转速和排出种子量之间的关系函数有误差，进而无法通过排种轮转速计算出实际播种量。因此，研究一种种子余量检测装置可准确得知实际播种量和种箱种子剩余播量，对实现加种子预警防止因种子余量不足影响播种作业具有重要意义。

为提高播种质量，国内外学者针对播种机播种监测和种箱检测等方面进行了深入研究。MEYER 等[13]研制了由 37 个六边形元件组成矩阵电压式传感器，可检测种子流量以及排种管堵塞情况，其最大检测频率达 1 500 粒/s。为了解决播种机高速播种过程中小麦种子大流量检测精度低等问题，文献[14-15]设计薄面激光-硅光电池监测装置，同时设计了种子流分流结构，提高了中小粒径种子高流量监测准确性。为实现气流输送播种机播种质量快速准确检测，赵博等[16]设计了一种基于压电陶瓷的弧形阵列式播种流量传感器，当排种量小于 170 粒/s 时，该传感器检测准确性高于 95%，其堵塞报警准确率达 100%。为了减少气送式油菜直播机播种过程中粉尘对检测系统的影响，李强等[17]设计了一种防尘除尘机构。

目前，针对箱体监测技术研究是研究热点。杨传雷[18]设计了一款基于高压氮气弹簧的播量检测装置，可实现对种箱或肥箱余量检测，但震动易影响其准确性和稳定性。文献[19-20]在种箱均匀安装多对红外发射接收装置，通过种子遮断红外光判断种箱种子余量，该装置具有结构简单、成本低等特点，但准确度易受种子谷面度影响。文献[21-22]通过安装在种箱盖的单个测距传感器测量种箱料位高度。ZHAO 等[23]开发了一种将肥箱点云数据转换为肥料体积的高效算法，试验结果表明，其检测肥箱余量误差低于 5%。ZHANG 等[24]利用安装于肥箱顶的多个红外测距传感器获取肥箱肥料三维数据，通过建模计算其体积，其平均误差为 2.42%。

综上所述，当前常用播种监测可分为两大类：①通过在排种管监测种子排出数[25-26]。②通过称量或测体积计算种箱种子余量[27]。其中监测排种管种子流误差随着排种频率呈指数增长，主要原因是高频率种子流下落过程会重叠，影响传感器识别。而通过称量种箱余量易受到旱地直播震动影响，且长时间负载影响称量传感器使用寿命。相较之下，通过测体积计算种箱种子余量的方法对传感器性能要求较低，同时对田间震动适应性较好，但目前传感器静态布置位置处于箱体上方，会影响箱体上盖布置方式；同时，在添加种肥时对传感器位置和精度亦会有影响。为此，本文设计一种适用于稻麦兼用气送式播种机的种箱余量监测系统，在 *XY* 轴移动平台上安装激光测距传感器，不接触式检测种箱空容积，以间接计算种箱种子余量。

1 种箱余量监测系统结构与工作原理

种箱余量监测装置主要由 *XY* 轴移动平台架、种箱、移动平台支架步进电机、U 槽型光电开关、激光测距传感器、显示屏和主控制器等组成，其结构如图 1 所示。

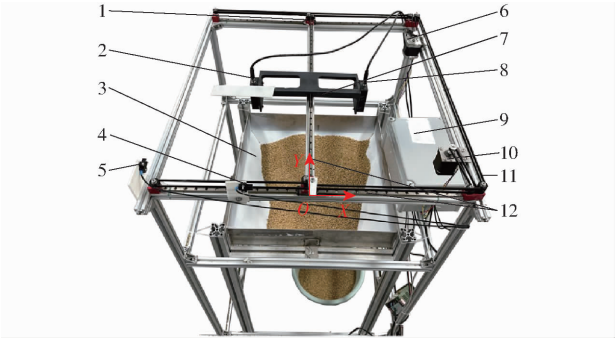


图 1 种箱余量监测装置硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of box margin detection device

1. *XY* 轴移动平台架 2. 激光测距传感器 a 3. 种箱 4. U 槽型光电开关 a 5. U 槽型光电开关 b 6. 步进电机 a 7. 主控制器 8. 激光测距传感器 b 9. 控制盒 10. 步进电机 b 11. 同步带 12. 滑轨

种箱余量监测装置控制系统框图如图 2 所示，该系统主要由移动控制系统、数据采集运算系统和人机交互系统组成。移动控制系统安装于种箱上方，主要包括 2 个步进电机、2 个 U 槽型光电开关和移动平台，步进电机通过同步带与移动平台架相连，并布置于滑轨上，通过控制 2 个步进电机旋转分别控制移动平台在 *X* 和 *Y* 方向移动，移动平台调零以及位置关系由 U 槽型光电开关控制，定位精度可达 0.1 mm；数据采集运算系统负责接收 2 个激光测距传感器（表 1 为激光测距传感器参数）的数据、处理数据并计算种箱种子余量；人机交互系统用于设置种箱种子容重和实时显示种子余量。开始工作时，在人机交互系统设置种子堆积密度并开始监测，移动控制系统控制 2 个步进电机和 2 个 U 槽型光电开

关调零位置控制移动平台按照特定路径移动。在移动平台移动到特定点时数据采集系统的 2 个激光测距传感器采集相应的距离数据。当经过所有特定点时系统会根据控制系统内置算法计算种子体积，最后根据堆积密度计算种箱内种子质量并显示于人机交互系统上。

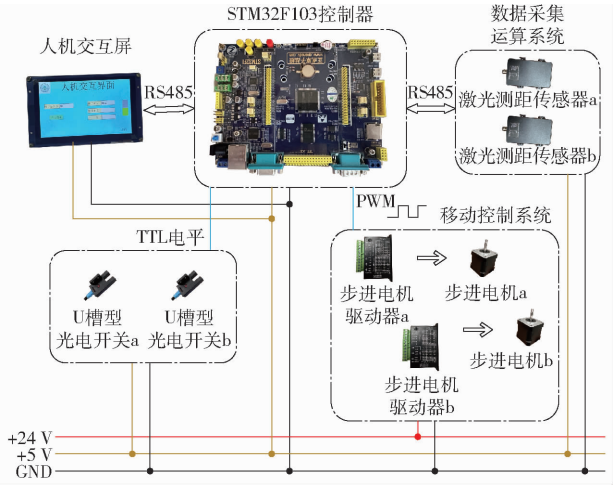


图 2　种箱余量监测装置控制系统框图

Fig. 2　Block diagram of control system of seed box allowance detection device

表 1　测距传感器技术参数

Tab. 1　Technical parameters of ranging sensor

参数	数值/型式
量程/m	40
测量精度	±(1 mm + 0.000 5D)，D 为实测距离
测量频率/Hz	20
通信接口	TTL UART
激光类型	Class Ⅱ 650 nm(点激光)

2　监测系统算法设计

2.1　平台移动算法

为了采集整个种箱种子点云数据，搭载激光测距传感器组的移动平台需要沿 X 方向来回运动。移动平台由 2 组步进电机控制，其运动指令包括：沿 X 轴前进和沿 X 轴后退。这两个运动指令分别对应 2 个步进电机以相同速度且相同旋转方向运行，对应关系如表 2 所示。

表 2　运动指令与电机旋转对应关系

Tab. 2　Correspondence between motion commands and motor rotation

对应动作	步进电机 a	步进电机 b
沿 X 前进	顺时针	顺时针
沿 X 后退	逆时针	逆时针

步进电机采用脉冲宽度调制(PWM)方法控制，利用 STM32 控制器设置定时器装载值以及定时器捕获比较值，自动产生 PWM 波从而对实现对步进电机控制。

2.1.1　加减速算法

为了使移动平台运行更加平稳、快速、冲击小且定位准确，步进电机启动应采用加减速算法。梯形加减速具有算法简单、响应快、效率高等优点，图 3 为梯形加减速 $v-t$ 曲线。

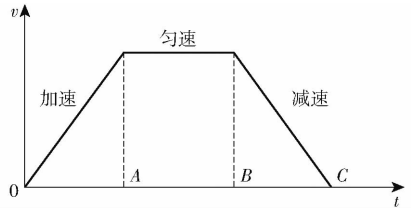


图 3　梯形加减速曲线

Fig. 3　Trapezoidal speed curve

根据设定的总步数(step)、加速度(accel)、减速度(decel)和最大速度(Max_ω)的关系，梯形加减速可分为 3 个阶段：加速阶段从静止开始，按设定的加速度逐步提高速度至最大速度；匀速阶段保持目标速度稳定运动；减速阶段按设定的减速度逐步降低速度至停止。

梯形加减速控制整体流程为：①设置参数，包括总步数、加速度、减速度、最大速度等。②判断总步数是否为正：如果为正，则电机正转；否则电机反转。③判断运行状态是否为减速状态：如是减速状态，则进一步判断总步数是否仅一步，如仅一步，则直接结束流程；否则继续判断步数是否为 0，如步数为 0，则结束流程；如步数不为 0，则计算出第 1 个脉冲定时计数器值 C_0 和最大脉冲数 n_{max}。④判断是否进入三角形模式，如进入三角形模式，则计算加速段步数(n_1)和减速段步数(n_2)。⑤然后判断 C_0 是否小于或等于 C_{min}(匀速运行最小 C 值)，如 $C_0 \leqslant C_{min}$，则进入加速状态；否则进入匀速状态。⑥最后设置定时器比较值(C_0 或 C_{min})，使能中断并开启定时器。梯形加减速整体流程图如图 4 所示。

系统进入中断处理流程后，设置定时器比较值以控制脉冲输出。检查当前运动状态，可能状态包括减速状态(DECEL)、匀速状态(RUN)、加速状态(ACCEL)和停止状态(STOP)。记录当前步数，步数加 1。判断是否处于减速或匀速状态(DECEL/RUN)：如是，则进一步判断新 C 是否等于 C_{min}。如新 C 等于 C_{min}，则进入匀速状态(RUN)；否则计算下一次的 C。判断是否为最后一步：如是最后一步，则进入结束流程；否则继续判断新 C 是否大于开始减速数。如新 C 大于开始减速数，则更新 C_{new}；否则结束流程。如满足停止条件，则停止电机运行。定时器中断流程图如图 5 所示。

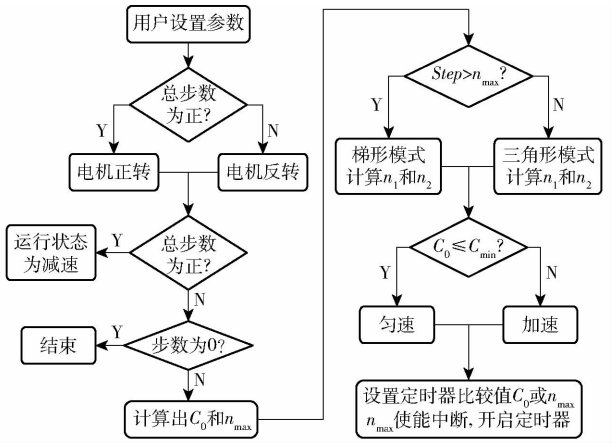


图 4 梯形加减速整体流程图

Fig. 4 Flowchart of trapezoidal acceleration-deceleration

2.1.2 自动调零算法

调零有 X 和 Y 轴两个方向,因此需 2 个限位开关,安装于调零位置(图 1),其中限位开关 1 作为 Y 轴方向,而限位开关 2 为 X 轴方向。当启动自动调零时,首先平台沿着 Y 轴向下运动,当平台到达 Y 轴方向限位时,限位开关 1 输出信号,触发 STM32F103 中断停止沿 Y 轴运动同时平台沿着 X 轴向右运动,当平台到达 X 轴方向限位时,限位开关 2 输出信号,触发中断停止沿着 X 轴运动,调零完成,图 6 为位置调零流程图。

2.2 监测算法

种箱余量监测通过计算种箱剩余种子体积间接

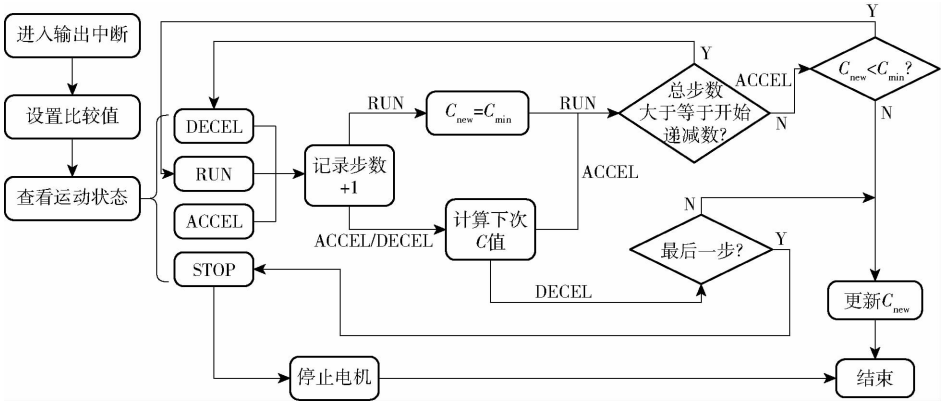


图 5 定时器中断流程图

Fig. 5 Flowchart of timer interrupt process

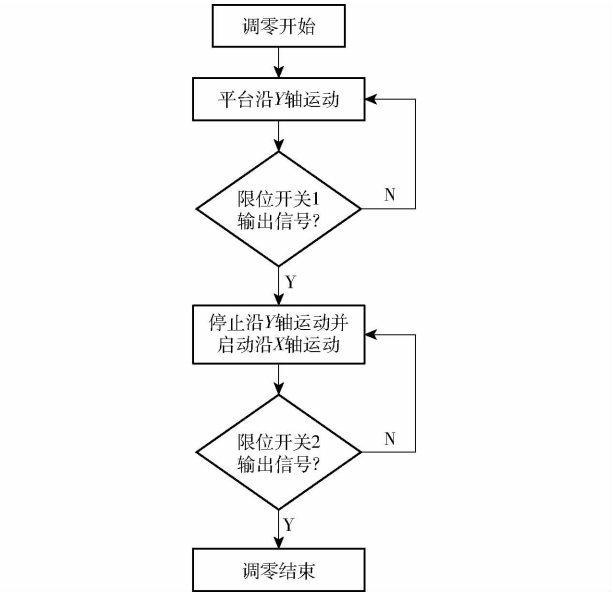


图 6 位置调零流程图

Fig. 6 Flowchart of position nulling

获取种箱余量。种箱种子剩余质量计算式为

$$M_z = V_y\rho = (V_B - V_k)\rho \tag{1}$$

式中 M_z——种箱种子剩余质量,kg

V_y——种箱剩余种子体积,m^3

V_B——种箱容积,m^3

V_k——种箱空腔体积,m^3

ρ——种子堆积密度,kg/m^3

由式(1)可知,种箱空腔体积计算模型构建是本设计核心,基于种箱空腔体积几何特征,空腔体积计算方法为:将不规则种箱空腔体切割成若干个接近规则子模块,分别计算各子单元体积后累加求和,图 7 为种箱空腔体计算方法步骤。具体而言,种箱空腔体 4 个侧面及顶面为平面,而底面呈曲面形态。采用平行于侧面的切割平面将空腔沿长度方向分割为 m 个薄片体,每个薄片体体积可近似为截面积与切片宽度乘积,最终求每个薄片体之和,空腔总体积计算公式为

$$V_k = \sum_{i=1}^{m} V_k^i = \sum_{i=1}^{m} S_i c = c \sum_{i=1}^{m} S_i \tag{2}$$

式中 V_k^i——第 i 个薄片体体积,m^3

S_i——第 i 个薄片体横截面面积,m^2

c——薄片体宽度,m

m——薄片体数量

所截面面积是一个不规则面,用定积分方式求其面积,将被积函数近似直线函数,被积部分近似梯形方法称为梯形积分法,而将抛物线近似函数曲线求定积分方法称为辛普森积分法。

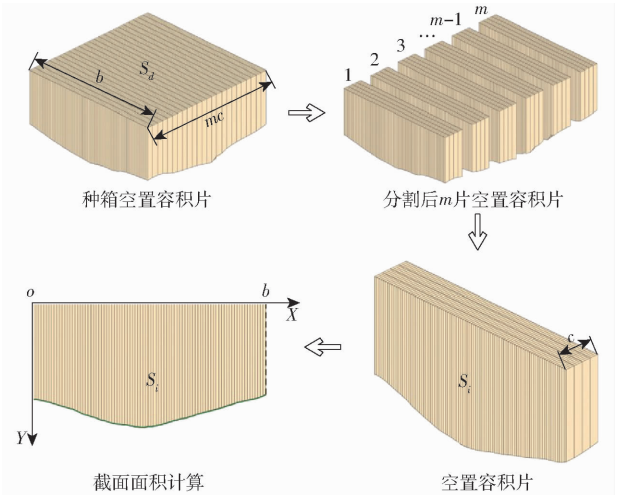


图 7　种箱空置容积体计算方法步骤

Fig. 7　Flowchart for calculation method of seed box vacant volume

2.2.1　梯形算法

梯形法则是将被积分区间分为 n 个小区间，将每个小区间的函数值连接起来，形成若干个梯形逼近所求不规则边界。此时，S_i 可写为

$$S_{it}=\int_0^b f_i(x)\,\mathrm{d}x\approx \frac{b}{2n}(f_i(x_0)+2f_i(x_1)+2f_i(x_2)+\cdots+2f_i(x_{n-1})+f_i(x_n))=\frac{b}{2n}\left(2\sum_{j=1}^{n-1}f_i(x_j)+f_i(x_0)+f_i(x_n)\right)\tag{3}$$

式中　$f_i(x)$——第 i 个薄片边界函数

n——积分区间数

b——薄片长度

x_j——第 j 个积分区间

$f_i(x_j)$——第 i 个薄片的第 j 个积分区间值

式(2)可写为

$$V_k=c\sum_{i=1}^{m}S_i=\frac{bc}{2n}\sum_{i=1}^{m}\left(2\sum_{k=1}^{n-1}f_i(x_k)+f_i(x_0)+f_i(x_n)\right)\tag{4}$$

梯形算法直观且易于实现，它通过将积分区间分割成多个小区间，并在每个小区间上近似函数为直线段来计算面积。梯形算法既能对线性函数给出精确结果，又能对非线性函数提供合理的近似值，尤其是当函数变化相对平缓时。

2.2.2　辛普森算法

与梯形法则用直线函数来近似被积函数不同，辛普森法则是将其等分成 n 个区间（n 为偶数），用抛物线来近似被积函数，再通过求定积分数值得到所截面得面积的。此时，S_i 可写为

$$S_{ix}=\int_0^b f_i(x)\,\mathrm{d}x\approx \frac{b}{3n}[f_i(x_0)+f_i(x_n)+4(f_i(x_1)+f_i(x_3)+\cdots+f_i(x_{n-1}))+2(f_i(x_2)+f_i(x_4)+\cdots+f_i(x_{n-2}))]=\frac{b}{3n}\left(4\sum_{j=1,3,5,\cdots}^{n-1}f_i(x_j)+2\sum_{j=2,4,6,\cdots}^{n-2}f_i(x_j)+f_i(x_0)+f_i(x_n)\right)\tag{5}$$

式(5)可写为

$$V_k=c\sum_{i=1}^{m}S_i=\frac{bc}{3n}\sum_{i=1}^{m}\left(4\sum_{j=1,3,5,\cdots}^{n-1}f_i(x_j)+2\sum_{j=2,4,6,\cdots}^{n-2}f_i(x_j)+f_i(x_0)+f_i(x_n)\right)\tag{6}$$

辛普森算法使用二次多项式来近似被积函数，因此在处理平滑且接近二次函数曲线时，能够提供更高的精度。尤其是在函数变化较为复杂或曲率较大情况下，辛普森法则通常能给出更准确的结果。

2.2.3　数据矫正算法

(1)获取有效空置容积片高度

由于测距传感器工作时一直处于运动状态，且采集数据传输和处理需要时间，导致 STM32 收集到数据存在时间差，通过实际平台运行得其时间差。因此，为了获取到实际为 X 轴采集的数据，需要剔除前段数据和补上后段数据，以弥补因数据传输造成的时间差，图 8 为弥补时间差处理前后对比。

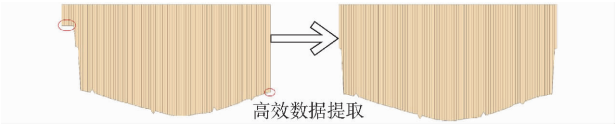


图 8　弥补时间差处理示意图

Fig. 8　Diagram of time difference compensation process

(2)边界异常值剔除

为了保证采集到完整的高度数据，激光测距传感器会测量到种箱边缘，因此在头尾位置产生了边界异常值。为了剔除边界异常值，量取种箱到传感器最大值和最小值，进而确定有效数据最大值和最小值，当剔除异常值数量大于设定值则判定此组采集数据无效，图 9 为边界异常值去除前后对比。

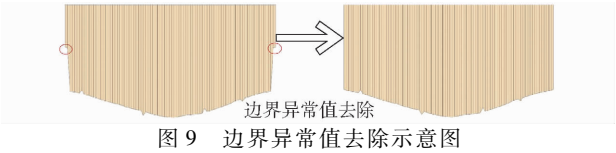


图 9　边界异常值去除示意图

Fig. 9　Diagram of boundary outlier removal process

(3)局部异常值剔除

由于传感器测量误差产生的局部异常值，造成局部“陡坡”，影响线条平稳性，如图 10 所示。为剔

除局部异常值,查询该播种机所播种种子最大自然休止角 θ,确定 2 次采集数据距离 d,由 $h = d\sin\theta$ 计算出两相邻数据最大差值。两相邻数据差值大于最大差值即判断该数据为局部异常值。图 10 为局部异常值去除前后对比。

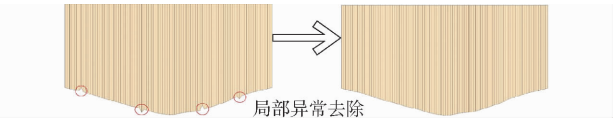


图 10 局部异常值去除示意图

Fig. 10 Diagram of local outlier removal process

3 台架试验

3.1 种子物理参数测量

3.1.1 堆积密度

由于种箱余量监测系统是通过测量种箱内种子堆积体积进而计算剩余种子质量,因此需要测定试验品种堆积密度 ρ。采用济麦 22(小麦)、黄华占(籼稻)和南粳 9108(粳稻)作为试验品种,其种子纯度不低于 99%。各品种种子堆积密度测量方法为:在漏斗下放置 5 L 透明塑料桶,将小麦种子倒入漏斗中,使其自然流入桶内直至溢出。使用直尺刮平桶口多余部分(刮平前避免移动桶),然后用电子秤测量桶内种子质量,如图 11 所示。重复上述试验 5 次,计算其质量平均值 M,种子堆积密度计算式为

$$\rho = \frac{M}{V} \tag{7}$$

式中 M——种子质量

V——种子体积



图 11 种子堆积密度测量

Fig. 11 Measurement of seed bulk density

1. 漏斗支架 2. 漏斗 3. 5 L 量桶 4. 电子秤

试验结果如表 3 所示。

3.1.2 最大自然休止角

根据 2.2.3 节局部异常值剔除算法,需要测量各类种子最大自然休止角,测试仪器如图 12 所示。采用济麦 22(小麦)、黄华占(籼稻)和南粳 9108(粳稻)作为试验品种,试验结果如表 3 所示。

表 3 种子物理参数测量结果

Tab. 3 Results of seed physical parameter measurements

品种	堆积密度/(g·L^{-1})	休止角/(°)
济麦 22(小麦)	876.44	43.50
黄华占(籼稻)	591.28	38.68
南粳 9108(粳稻)	565.54	36.24



图 12 休止角测定

Fig. 12 Angle of repose measurement

3.2 监测算法优化

根据 2.2 节结果,空腔体积计算精度会受到薄片体数量 m(m 为采集三维点云数据的行数,即为激光测距传感器数量)和积分方法的影响。为探究不同 m 和不同积分方法对监测准确性的影响,进行了台架试验,种箱余量监测系统安装于种箱上方,如图 1 所示。分别取 m 为 3、4、5 和 6 进行试验,每组试验将 310 L 种子倒入种箱,每排出 24 L 种子监测 1 次,每次监测分别以梯形算法和辛普森算法计算监测值,试验监测值与实际值如表 4 所示。监测绝对误差如图 13、14 所示。

由图 13 可知,随着种子体积减小,辛普森算法和梯形算法绝对误差增大。辛普森算法和梯形算法绝对误差交点在 118 L 和 142 L 之间。在小至中等体积区间(0 ~ 142 L),两种算法误差接近,均呈相似趋势,误差集中在 0 ~ 8 L 之间,但梯形算法绝对误差优于辛普森算法。在大体积区间(142 ~ 310 L),辛普森算法误差显著低于梯形算法,且整体趋势更平稳,表明其在大体积场景下具有更高的计算精度和可靠性。具体表现为:当种子余量大于 142 L 时,辛普森算法监测绝对误差小于梯形算法;而当种子余量小于 142 L 时,梯形算法的监测绝对误差小于辛普森算法。这与种箱结构密切相关:种箱上部

表 4　种箱余量监测台架试验监测值

Tab. 4　Results of seed box residue monitoring bench test　　L

实际值	辛普森算法				梯形算法			
	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$
310	308.61	308.89	309.80	308.30	308.48	308.76	309.64	308.04
286	282.16	283.36	283.43	283.29	281.92	283.07	283.09	283.05
262	256.97	259.60	259.13	260.25	256.48	259.32	258.76	260.10
238	235.99	237.13	235.97	236.82	235.37	236.89	235.60	236.79
214	212.95	212.83	213.00	212.86	212.11	212.53	212.59	212.63
190	187.45	189.88	189.71	188.48	187.10	189.74	189.22	188.17
166	164.26	165.08	165.70	165.74	163.81	164.75	165.48	165.31
142	140.37	139.82	141.05	141.85	139.92	139.69	140.16	141.60
118	119.31	120.08	120.50	120.42	119.21	119.38	119.83	119.76
94	99.53	97.76	98.51	98.04	98.51	97.60	97.95	97.36
70	76.13	75.27	74.14	73.03	75.83	74.57	73.25	72.48
46	55.02	53.80	48.12	47.23	54.55	53.69	47.57	46.99
22	28.09	28.01	23.18	22.76	27.18	27.94	22.87	22.50
0	2.34	0.43	0.44	0.57	2.07	0.26	0.37	0.49

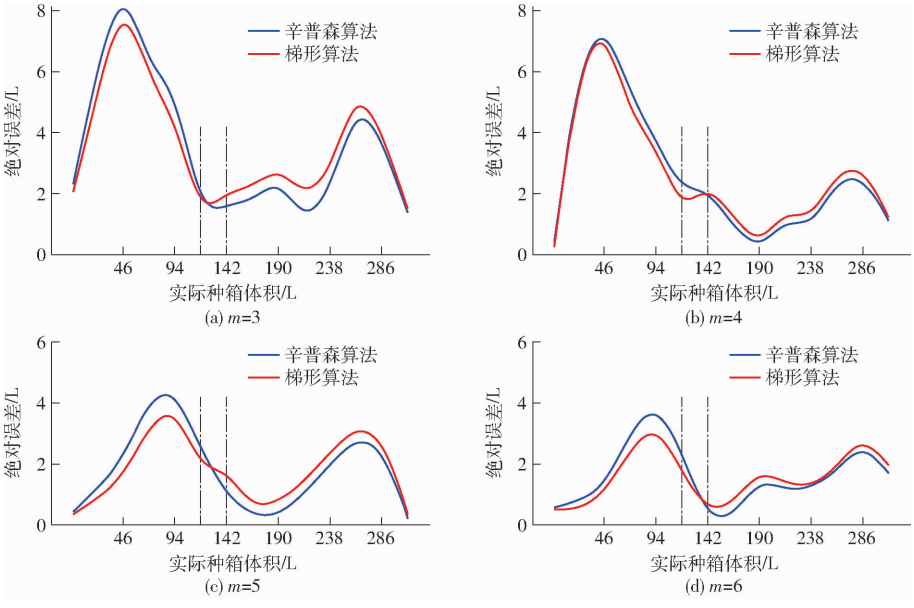


图 13　不同算法对绝对误差的影响

Fig. 13　Impact of different algorithms on absolute error

分为上下开口立方体(1 200 mm × 800 mm × 200 mm),下部分为上下开口的棱台体(上开口尺寸为 1 200 mm ×800 mm,下开口尺寸为 190 mm ×210 mm,高度为 300 mm),如图 15 所示。当种子体积高于 142 L 时,传感器监测到倾斜角较小,相对平缓种子表面,其边界更接近抛物线,对于辛普森算法适应性较好;而当种子容量低于 142 L 时,传感器监测到的种子表面倾斜角增大,其边界更接近直线,对梯形算法适应性较好。因此,当种子容量大于 142 L 时采用辛普森算法,小于 142 L 时采用梯形算法,这种组合方式称为综合算法,能够减小监测误差,提高监测准确性。综合算法执行流程图如图 16 所示。根据实际播种情况,播种时种箱内种子越来越少,故而将初始算法标志设置为辛普森算法,并且仅在使用辛普森算法时判断输出结果是否跨越阈值 142 L。直到计算结果小于 142 L 时切换为梯形算法并且保持不变至计算结束。

由图 14 可知,当 m 从 3 增加到 6,辛普森算法和梯形算法绝对误差呈相同趋势,均在减小,但减少的绝对误差有细微差别。在小至中等体积区间(0 ~ 142 L),随着 m 增大,绝对误差呈减小趋势,m 从 3 增加到 4 和从 5 到 6,绝对误差减小幅度较小,小于 0.5 L;m 从 4 增加到 5,绝对误差减小幅度较大,大于 2 L。在大体积区间(142 ~ 310 L),随着 m 增大,除 $m=3$ 时曲线明显高于其他曲线外,$m=4$、5、6 时曲线均处于波动状态,没有明显减小趋势。

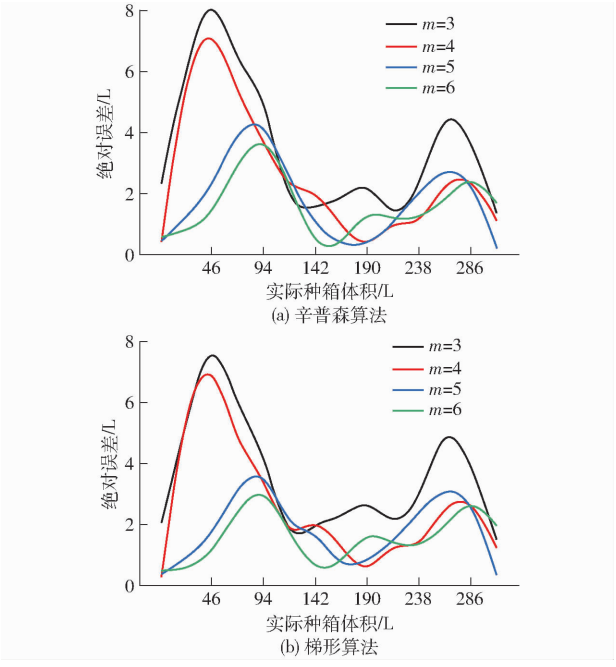


图 14 不同 m 值对绝对误差的影响

Fig. 14 Impact of different m values on absolute error

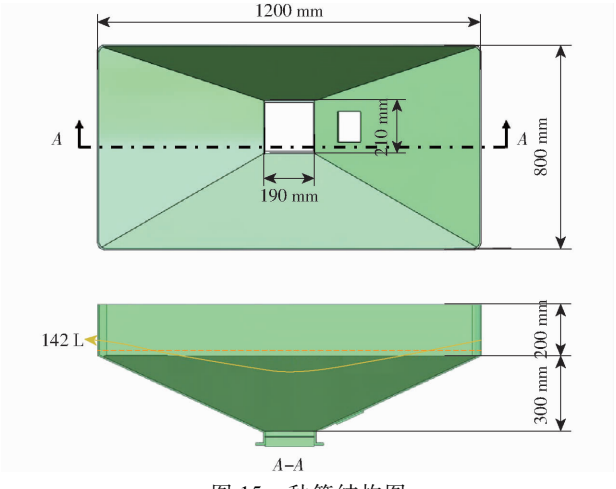


图 15 种箱结构图

Fig. 15 Seed box structure diagram

说明 m 可以较为显著地减小监测算法在小至中等体积区间(0 ~ 142 L)的绝对监测误差,提高监测准确性。同时,不同 m 下最大绝对误差:当 m 为 3 时,最大绝对误差为 9.01 L;当 m 为 4 时,最大绝对误差为 7.79 L;当 m 为 5 时,最大绝对误差为 4.51 L;当 m 为 6 时,最大绝对误差为 4.04 L。随着 m 增大,监测绝对误差逐渐降低,且当 m 为 5 时趋于平缓。然而,m 越大,所需的传感器数量越多,成本增加,计算时间增加。综合考虑监测误差、实时性和成本,最终选择 m 为 5 作为最优值。

综上所述,种箱监测算法采用“综合算法和 $m=5$”方案,综合梯形算法小体积优势和辛普森算法大体积优势。这一方案在保证监测准确性的同时,兼顾了成本效益。此时监测系统绝对误差小于 4 L,完成一次监测的时间控制在 1.5 s 以内。

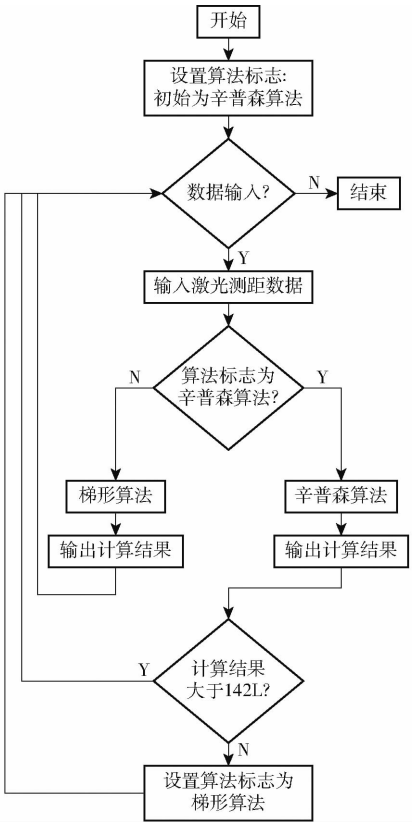


图 16 综合算法执行流程图

Fig. 16 Comprehensive algorithm execution flowchart

4 田间试验

为探究稻麦兼用气送式播种机种箱余量监测系统在机具上实际工作性能,于 2024 年 12 月在广东省广州市黄埔区大吉沙岛试验基地开展田间试验。监测算法根据台架试验结果设置为“综合算法和 $m=5$”方案。以雷沃 1204 型拖拉机为牵引力,播种机具为华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室研制的稻麦兼用气送式播种机,其播种幅宽为 2.4 m,播种行数为 12。将种箱余量监测系统安装于播种机种箱上方,该种箱(容积 311 L)上部分为上下开口立方体,下部分为上下开口锥台体,如图 17 所示。分别将小麦、粳稻和籼稻种子装入种箱,同时将网袋固定于每条排种管,便于收集排出实际种子量,开展田间播种试验。根据小



图 17 田间试验示意图

Fig. 17 Schematic of field experiment

麦、粳稻和籼稻常用的播种作业方法，以作业行驶速度 8 km/h，分别开展排种轮转速为 15、30、45、60 r/min 田间试验，每次试验播种 200 m，播种前开启监测系统并记录首次监测值，播种结束后记录最后一次监测值，收集排出种子并称量，田间试验结果如表 5 所示。

表 5　监测装置田间播种试验结果

Tab. 5　Field sowing test of detection device

品种	排种器转速/(r·min^{-1})	实际播种量/kg	监测播种量/kg	监测播种量误差/kg	播种量相对误差/%
小麦	15	7.02	7.44	0.43	6.10
	30	13.88	14.25	0.37	2.69
	45	20.08	21.01	0.93	4.61
	60	26.49	27.47	0.99	3.73
粳稻	15	4.97	5.33	0.35	7.07
	30	9.84	10.56	0.72	7.29
	45	14.24	15.03	0.79	5.56
	60	18.78	19.66	0.88	4.67
籼稻	15	4.68	5.07	0.39	8.26
	30	9.26	9.71	0.44	4.77
	45	13.41	14.31	0.90	6.73
	60	17.68	18.71	1.03	5.84

由表 5 可知，当排种轮转速为 15 ~ 60 r/min 时，种箱余量监测系统对小麦播种量最大监测误差为 0.99 kg，最大监测相对误差为 6.10%；对粳稻播种量最大监测误差为0.88 kg，最大监测相对误差为 7.29%；对籼稻播种量最大监测误差为 1.03 kg，最大监测相对误差为 8.26%。小麦监测精度最高，粳稻次之，籼稻误差最大，但 3 类种子监测相对误差保持在 10% 以内，监测效果总体较好，满足稻麦兼用播种机对于播量及种箱余量监测要求。3 种种子监测误差存在差异，这与种子物理性质密切相关，小麦种子表面较为光滑，自然堆积状态下，种子之间空隙较小，堆积表面平整度最好，激光测距传感器的测距精度最高，其监测绝对误差最小；粳稻种子表面具有绒毛特征，相较于小麦种子，其表面较为粗糙，种子之间堆积空隙较大且不均匀，堆积表面平整度较差，导致激光测距传感器测量精度减小，监测绝对误差也较大。籼稻种子表面也具有绒毛特征，相较于粳稻种子，其三轴尺寸差异较大，提高了堆积空隙及堆积不均匀性，堆积表面平整度进一步减小，导致激光测距传感器测量精度进一步减小，监测绝对误差进一步增大。

5　结论

(1)设计了 *XY* 轴移动平台用于采集种箱种子三维数据，根据测距传感器的采集路径，分析“无效”数据的原因并剔除“无效”数据，基于切割法、近似法和积分法的思想，提出了 2 种计算种箱种子体积的方法。

(2)台架试验结果表明，梯形算法和辛普森算法在不同容积下的监测准确性不同。根据试验结果提出了综合算法，即当种子容量大于 142 L 时采用辛普森算法，小于 142 L 时采用梯形算法。并通过试验确定最佳 m。

(3)田间试验结果表明，种箱余量监测系统对小麦播种量最大监测误差为 0.99 kg，最大监测相对误差为 6.10%；对粳稻播种量最大监测误差为 0.88 kg，最大监测相对误差为 7.29%；对籼稻播种量最大监测误差为 1.03 kg，最大监测相对误差为 8.26%。3 类种子监测相对误差保持在 10% 以内，监测效果总体较好，满足稻麦兼用播种机对于播量及种箱余量监测要求。

参　考　文　献

[1] 罗海峰，刘光辉，吴明亮，等. 外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(3)：227 - 239.
LUO Haifeng, LIU Guanghui, WU Mingliang, et al. Design and experiment of precision seed metering device for rice bud seed with protruding disturbing species[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 227 - 239. (in Chinese)

[2] 郑娟，赖虹宇，李甜，等. 小麦宽苗带气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(增刊 1)：165 - 176，335.
ZHENG Juan, LAI Hongyu, LI Tian, et al. Design and test of precision seed metering device for wheat wide seedling belt with air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 1): 165 - 176, 335. (in Chinese)

[3] 罗锡文，廖娟，胡炼，等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报，2021，42(6)：8 - 17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8 - 17. (in Chinese)

[4] 王在满. 同步开沟起垄水稻机械化穴播技术研究[D]. 广州：华南农业大学，2016.
WANG Zaiman. Design and experiments of precision rice hill-drop drilling technology with synchronous furrowing and ridging [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[5] 王磊，席日晶，廖宜涛，等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(8)：62 - 72.

WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62 - 72. (in Chinese)

[6] 廖宜涛,刘嘉诚,廖庆喜,等. 正负气压组合滚轮式油菜精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(5):63 - 76.
LIAO Yitao, LIU Jiacheng, LIAO Qingxi, et al. Design and test of positive and negative pressure combination roller type precision seed-metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 63 - 76. (in Chinese)

[7] 戴亿政, 罗锡文, 王在满, 等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016,32(24):36 - 42.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36 - 42. (in Chinese)

[8] 戴亿政, 罗锡文, 张明华, 等. 气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020,36(10):1 - 8.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, ZHANG Minghua, et al. Design and experiments of the key components for centralized pneumatic rice dry direct seeding machine[J]. Transactions of CSAE, 2020, 36(10): 1 - 8. (in Chinese)

[9] 施彬彬, 王传奇, 陈雪儿, 等. 油麦兼用气送式集排器立槽式供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(9): 102 - 115.
SHI Binbin, WANG Chuanqi, CHEN Xueer, et al. Design and experiment of vertical groove seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9):102 - 115. (in Chinese)

[10] 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 CSAE, 2021, 37(8): 30 - 41. (in Chinese)

[11] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲, 等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018,34(12): 16 - 26.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of CSAE, 2018, 34(12): 16 - 26. (in Chinese)

[12] 廖宜涛,王传奇,施彬彬,等. 油麦兼用气送式排种系统高通量混种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12): 134 - 146.
LIAO Yitao, WANG Chuanqi, SHI Binbin, et al. Design and test of high-throughput seed mixing device for rapeseed and wheat with air-fed seed discharging system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12):134 - 146. (in Chinese)

[13] MEYER ZU HOBERGE S, HILLERINGMANN U, JOCHHEIM C, et al. Piezoelectric sensor array with evaluation electronic for counting grains in seed drills[C]// IEEE Africon'11, Victoria Falls, 2011.

[14] 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 CSAE, 2022, 38(18): 81 - 91. (in Chinese)

[15] 丁幼春, 朱凯, 王凯阳, 等. 薄面激光-硅光电池中小粒径种子流监测装置研制[J]. 农业工程学报, 2019,35(8):12 - 20.
DING Youchun, ZHU Kai, WANG Kaiyang, et al. Development of monitoring device for medium and small size seed flow based on thin surface laser - silicon photocell[J]. Transactions of CSAE, 2019, 35(8): 12 - 20. (in Chinese)

[16] 赵博, 樊学谦, 周利明, 等. 气流输送播种机压电式流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(8):55 - 61.
ZHAO Bo, FAN Xueqian, ZHOU Liming, et al. Design and test of piezoelectric flow sensor for pneumatic seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(8):55 - 61. (in Chinese)

[17] 李强, 余秋丽, 李浩鹏, 等. 油菜播种机除尘式播量监测系统设计与试验[J]. 智慧农业(中英文), 2024, 6(3): 107 - 117.
LI Qiang, YU Qiuli, LI Haopeng, et al. Design and test of dust removal seeding rate monitoring system for rapeseed seeders[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 107 - 117. (in Chinese)

[18] 杨传雷. 小麦播种施肥一体机的优化设计与试验[D]. 南京:南京农业大学, 2020.
YANG Chuanlei. Optimal design and test of a wheat sowing and fertilizing applicator[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[19] 黄操军, 陶冶, 许秀英. 基于 SDI - 12 的播种机种肥监测传感器研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2012,24(2): 80 - 83.
HUANG Caojun, TAO Ye, XU Xiuying. Research on monitoring sensor of planter seeding and fertilizing situation based on SDI - 12 protocol[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012,24(2):80 - 83. (in Chinese)

[20] 郭子豪. 基于 LabVIEW 的免耕播种机工作性能检测系统设计[D]. 昆明:昆明理工大学, 2019.
GUO Zihao. Design of no-till seeder working performance detection system based on LabVIEW[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[21] 裴娟. 水稻精量穴直播机播种量监测系统研究[D]. 广州:华南农业大学, 2020.
PEI Juan. Study on sowing quantity monitoring system for precision rice hill-drop drill machine[D]. Guangzhou: South China

Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[22] 吴宝山. 基于北斗/GPS 双模差分定位的播种机作业状态监测系统[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018.
WU Baoshan. Planter state monitoring system based on Beidou/GPS dual mode differential positioning[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[23] ZHAO J, WANG X, TIAN H, et al. A fertilizer discharge detection system based on point cloud data and an efficient volume conversion algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,185:106131.
[24] ZHANG Y, ZHANG K, YU Y, et al. Remnant fertilizer monitoring system for maize fertilizer applicators[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023,16(5):181 - 188.
[25] 张甜, 蒋乐, 李兆东, 等. 光纤计数式油菜精量排种器种子流检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2023,54(1):64 - 74, 145.
ZHANG Tian, JIANG Le, LI Zhaodong, et al. Seed flow detection system of optical fiber counting rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):64 - 74, 145. (in Chinese)
[26] 丁幼春, 王雪玲, 廖庆喜. 基于时变窗口的油菜精量排种器漏播实时检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 11 - 21.
DING Youchun, WANG Xueling, LIAO Qingxi. Method of real-time loss sowing detection for rapeseed precision metering device based on time changed window[J]. Transactions of CSAE, 2014, 30(24): 11 - 21. (in Chinese)
[27] 孙永佳, 沈景新, 窦青青, 等. 基于 Cortex - M3 的免耕播种机监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(8): 50 - 58.
SUN Yongjia, SHEN Jingxin, DOU Qingqing, et al. Design and test of monitoring system of no-tillage planter based on Cortex - M3 processor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(8):50 - 58. (in Chinese)

(上接第 82 页)

[14] CHEN J, GUAN T, YUAN Z, et al. Development of high-speed precision maize metering device for dense planting pattern with standard ridges[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15:1452699.
[15] 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.
[16] 衣淑娟, 张淯朋, 戴智博, 等. 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[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 261 - 274.
YI Shujuan, ZHANG Yupeng, DAI Zhibo, et al. Design and experiment of positive pressure airflow guide groove seed guiding device for maize delta-row high-speed precision seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):261 - 274. (in Chinese)
[17] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 61 - 73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7): 61 - 73. (in Chinese)
[18] YANG L, HE X, CUI T, et al. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision corn planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 1 - 9.
[19] LING L, LI H, XIAO Y, et al. Study on seeding delay time and lag distance of automatic section control system for maize seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110068.
[20] LING L, WU G, WEN C, et al. Influence of speed measurement method on performance of an electric-drive maize precision planter[J]. Biosystems Engineering, 2024, 238: 175 - 187.
[21] LING L, XIAO Y, HUANG X, et al. Design and testing of electric drive system for maize precision seeder[J]. Agriculture, 2024, 14(10): 1778.
[22] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 51 - 59.
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):51 - 59. (in Chinese)
[23] 和贤桃, 丁友强, 张东兴, 等. 玉米精量排种器电驱 PID 控制系统设计与性能评价(英文)[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 28 - 33.
HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Design and evaluation of PID electronic control system for seed meters for maize precision planting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 28 - 33.
[24] DU Z, YANG L, ZHANG D, et al. Development and testing of a motor drive and control unit based on the field-oriented control algorithm for the seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 108024.
[25] MOHANRAJ D, ARULDAVID R, VERMA R, et al. A review of BLDC motor: state of art, advanced control techniques, and applications[J]. IEEE Access, 2022, 10: 54833 - 54869.
[26] ZHAI C, LONG J, TAYLOR R, et al. Field scale row unit vibration affecting planting quality[J]. Precision Agriculture, 2020, 21(3): 589 - 602.