

基于气流辅助的颗粒肥流量光电检测系统设计与试验

梅博胜^{1,2} 付卫强^{1,2} 颜丙新^{1,2} 罗长海¹ 李立伟¹ 孟志军¹ 武广伟^{1,2}

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.华中农业大学工学院,武汉 430070)

摘要: 针对颗粒肥料相互遮挡以及外槽轮排肥器引起的肥料分布不均现象,造成颗粒肥流量难以高精度检测的问题,本文提出一种基于气流辅助的颗粒肥流量光电检测方法,设计一种气流辅助光电式颗粒肥流量传感器,利用正压气流辅助肥料流形重构,采用仿真与静态试验相结合的方式构建检测模型,模型引入料流体积作为中介变量,通过面元积分法求解肥料流量。以磷酸二铵为试验材料,通过静态试验确定肥料流等效直径与光电传感器响应电压之间的显著线性关系,基于标定试验建立了修正系数多元回归模型,最终构建了肥料流量检测模型。搭建了试验台架并开展检测方法验证试验。试验结果表明,在有气流辅助条件下,基于电压与体积反馈的颗粒肥流量检测模型(U-V-Q检测模型)平均绝对百分比误差(MAPE)不超过4.55%,均方根误差(RMSE)不大于3.82 g/s,表明基于气流辅助的颗粒肥流量光电检测法具有较高的检测精度及良好的检测稳定性。相较于无气流辅助装置U-V-Q检测模型,MAPE降低2.44%,MSD降低0.74%,此外,在有气流辅助装置情况下,U-V-Q检测模型的MAPE较基于电压与肥料流量之间转换模型(U-Q检测模型)降低9.03%。研究结果表明,单独采用气流辅助或使用U-V-Q检测模型都难以获得理想检测效果,将气流辅助技术和U-V-Q检测模型相结合,能够显著提高颗粒肥流量检测精度和稳定性,为施肥机流量实时检测提供了新思路,对精准变量施肥系统闭环控制具有重要意义。

关键词: 精准变量施肥; 颗粒肥流量; 气流辅助; 光电传感器; 精准检测

中图分类号: S223.2⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)10-0088-11

OSID:



Design and Experiment on Photoelectric Detection System for Flow Rate of Granular Fertilizer Based on Airflow Assistance

MEI Bosheng^{1,2} FU Weiqiang^{1,2} YAN Bingxin^{1,2} LUO Changhai¹ LI Liwei¹ MENG Zhijun¹ WU Guangwei^{1,2}

(1. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: During the flow of granular fertilizers, they tended to obstruct each other, and the external wheel-type fertilizer distributor further caused uneven distribution, making it challenging to accurately measure the fertilizer flow. To address this issue, an airflow-assisted photoelectric detection method that enabled more accurate measurement of granular fertilizer flow was proposed. An airflow-assisted photoelectric granular fertilizer flow sensor was designed, utilizing positive pressure airflow to assist in the reconstruction of the fertilizer flow pattern. A detection model was developed by integrating simulation and static experiments. The model incorporated fertilizer flow volume as an intermediate variable and calculated the flow rate through an area element integration algorithm. Using diammonium phosphate as the test material, static experiments revealed a significant linear relationship between the equivalent diameter of the fertilizer flow and the sensor's response voltage. The correction coefficient's multiple regression model was determined through calibration experiments, thus constructing the fertilizer flow detection model. To validate the effectiveness of the method, a dedicated test platform was set up for verification experiments. The test results showed that under airflow-assisted conditions, the U-V-Q detection model achieved an average absolute percentage error (MAPE) of no more than 4.55%, and a

收稿日期: 2025-02-23 修回日期: 2025-04-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1701000)、国家农业科技项目(20221805)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-02)

作者简介: 梅博胜(1997—),男,硕士生,主要从事农机装备智能化研究,E-mail: 13051675620@163.com

通信作者: 武广伟(1981—),男,研究员,博士,主要从事农机智能装备研究,E-mail: wugw@nrcita.org.cn

root mean square error (RMSE) of no more than 3.82 g/s. This demonstrated that the airflow-assisted photoelectric detection method for granular fertilizer flow had high detection accuracy and good stability. Compared with the U - V - Q detection model without the airflow assistance device, the MAPE was reduced by 2.44% , and the MSD was reduced by 0.74% . Furthermore, with the airflow assistance device, the MAPE of the U - V - Q detection model was 9.03% lower than that of the U - Q detection model. The research results indicated that using airflow assistance alone or the U - V - Q detection model alone did not achieve optimal detection performance. However, combining airflow assistance technology with the U - V - Q detection model significantly improved both the accuracy and stability of granular fertilizer flow detection, providing insights for real-time flow detection in fertilization machines, which was of great significance for the closed-loop control of precision variable-rate fertilization systems.

Key words: precision variable-rate fertilization; granular fertilizer flow rate; airflow assistance; photoelectric sensor; accurate detection

0 引言

施肥是农业生产中必不可少的作业环节^[1],精准变量施肥技术对提高肥料利用率和减少化肥施用量起着至关重要的作用^[2]。排肥量检测是精准变量施肥控制系统实现闭环控制的关键^[3]。因此,开展颗粒肥流量动态高精度检测方法研究具有重要意义^[4]。

国内外在固体颗粒肥料流量实时检测技术方面开展了广泛的研究^[5]。根据检测原理,固体颗粒肥流量检测方法包括动态称量法、微波测量法、电容测量法、光电测量法以及机器视觉测量法^[6]。其中,动态称量法检测装置结构复杂,不利于后期安装和维护^[7-8];微波测量法易受机具振动和噪声的干扰^[9-10];电容测量法受颗粒肥料含水率的影响较大^[11-12];光电测量法在大流量施肥场景因颗粒遮挡难以实现准确检测;机器视觉测量法对算法和控制算力要求较高,且成本较高^[13]。

光电法在物料检测领域应用广泛。SWISHER 等^[14]设计了一种测量气流中颗粒肥料流量的光学传感器,验证了传感器的输出信号与质量流量具有较强的线性关系。美国 Precision Planting 公司研制的“Clarity 系统”^[15],通过光学堵塞传感器检测各行颗粒肥料流量,依据传感器信号的强弱测量肥料流量大小以及各行肥料流量的均匀性。农峰等^[16]设计了一种将高通量颗粒流离散化及分流序列化并行检测装置,通过脉冲计数的方式获得肥料流量,在作业速度为 4.3 ~ 7.0 km/h 下,检测准确率不低于 90.05%。和贤桃等^[17]设计了一种涡轮导流机构使颗粒肥料离散均匀化,再通过光电传感器对颗粒肥流量进行实时检测。JIANG 等^[18]基于光量阻挡原理开展颗粒化肥流量检测方法研究,肥料流量与传感器响应电压间决定系数高于 0.992,检测模型平均绝对百分比误差不超过 5.18%。以传感器响应

电压与肥料流量之间的直接关系构建的检测模型(U - Q 检测模型),在实际工作环境下,易受到多种因素的影响,检测精度受限。采用体积流量计算质量流量,可以提高测量准确性和稳定性。文献[19 - 20]发现可以利用团簇的直径与长度估算管道中颗粒物料质量流量,建立了光电探测器脉宽与肥料流量关系模型,在高密度肥料流量检测误差不超过 2%。文献[21 - 22]构建了光电传感器输出脉宽电压信号与刮板谷物厚度之间的关系模型,通过升运器上谷物体积和密度测算谷物产量信息。郭春江^[23]使用单线激光雷达提取肥箱内肥料表面三维特征,通过动态区域特征识别算法计算肥料流体积变化,表征肥料流量变化。颗粒肥料在动态播施过程表现出非稳定流态特性,通过气流辅助技术稳定颗粒肥流态。

气流辅助技术具有适应性好、效率高的特点,被广泛应用于农业生产中。ZHANG 等^[24]设计了一种锥形螺旋气流高速导种装置,利用高速正压气流约束种子运动轨迹。王龙宝等^[25]设计了一种小麦气流辅助直线投种装置,对种子产生柔性约束,减少其与管壁的碰撞。辛明金等^[26]设计了一种超大颗粒肥气力式加速器,利用双螺旋高压气流减少肥料颗粒与管壁碰撞。气流辅助技术在优化颗粒物料运动轨迹方面具有良好的效果,对颗粒肥流量检测装置设计具有重要的借鉴意义。

为实现颗粒肥料流量实时高精度检测,本文提出一种基于气流辅助的颗粒肥流量光电检测方法。通过环隙气流辅助装置对颗粒肥料流进行流形重构,引入料流体积作为中介变量,采用仿真模拟与静态试验相结合的方式,构建光电信号与肥料流量之间的转换模型。在此基础上,设计气流辅助光电式颗粒肥流量传感器并搭建试验台,以验证气流辅助技术对颗粒肥流量检测精度的提升效果以及对模型稳定性的增强作用。

1 检测原理与系统设计

1.1 检测原理

光电检测原理如图 1 所示,红外光发射器发出的红外光线照射到颗粒肥料上,部分光线被遮挡,未被遮挡的光线照射到光电接收端产生光电流,光电流的大小与接收到的光强成正比。颗粒肥料流量越大,料流体积越大,遮挡光线越多,光电流越小。

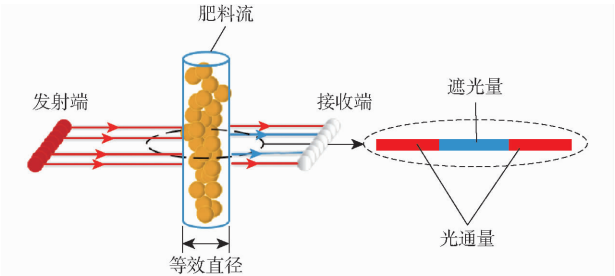


图 1 检测原理示意图
Fig. 1 Schematic of detection principle

结合红外光电传感机理分析,检测区域中心分布料流相较于偏向一侧料流具有更好的检测优势。引入气流辅助装置,提出一种基于气流辅助的颗粒肥流量光电检测法。利用气流的柔性约束,使肥料颗粒向中心汇聚形成更加稳定的圆柱状料流,减少肥料颗粒的不规则分布,提高检测传感器的稳定性。同时,通过引入料流体积作为中介变量,构建基于电压(U)与体积(V)反馈的颗粒肥流量(Q)检测模型($U-V-Q$),通过计算单位时间内通过检测区域的料流体积,并利用料流体积与质量流量之间的关系,实现更精确的颗粒肥料流量检测。

1.2 检测系统设计

气流辅助光电式颗粒肥流量检测系统如图 2 所示,主要由供肥系统、流量检测系统和数据采集与处理系统构成。施肥作业时,正压气流进入气流辅助装置,从环隙气缝排出,均匀作用在排肥器排出的肥料颗粒,使颗粒肥料向中心区域聚拢,最终在气流稳定区域形成一股类圆柱形的料流。安装在此处的光电传感器对颗粒肥流量进行检测,通过数据采集与处理系统转换为实时的流量数据,上传至计算机显示。

气流辅助光电式颗粒肥流量传感器是检测系统的核心部分,其性能直接影响测量的准确性。结构如图 3a 所示,主要由环隙气流辅助装置和红外光电传感器组成。

环隙气流辅助装置影响肥料颗粒的运动状态以及肥料成形情况,环隙气流辅助送肥装置整体呈圆管状,结构示意图如图 3b 所示,自上而下依次包括进肥管、进气管、气腔、变径管、出肥管等,为了更好

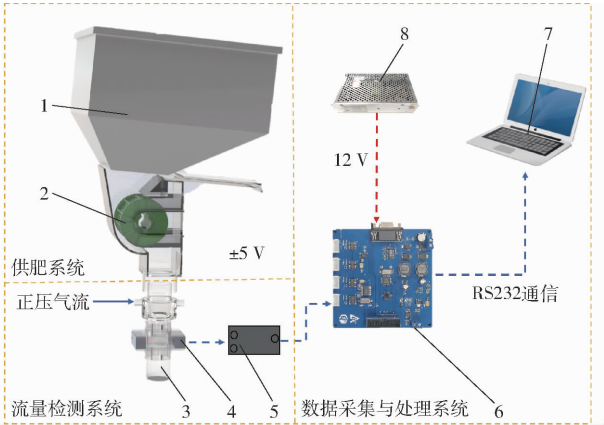


图 2 气流辅助光电式颗粒肥流量检测系统
Fig. 2 Airflow-assisted photoelectric granular fertilizer flow detection system

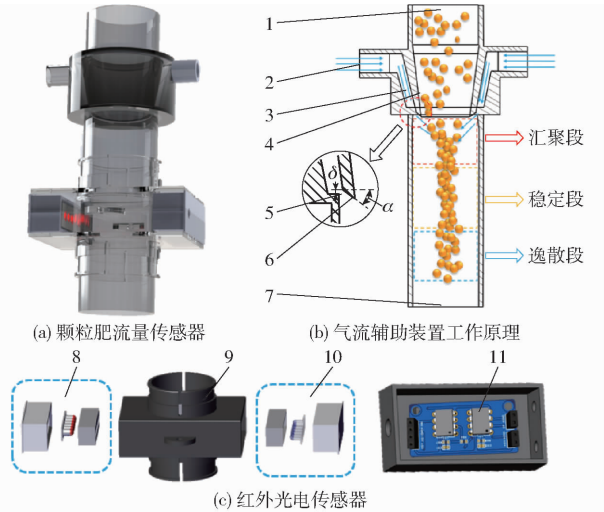


图 3 传感器结构示意图
Fig. 3 Schematic of sensor structure

1. 进肥管 2. 进气管 3. 气腔 4. 变径管 5. 环隙气缝 6. 导流板 7. 出肥管 8. 光电发射端 9. 传感器外壳 10. 光电接收端 11. 信号处理模块

地观察肥料运动状态,对气流辅助装置进行加长处理,整体高为 155.0 mm,环隙气缝由变径管下端与气腔底部共同构成,气缝开度 δ 为 1.1 mm。同时变径管尾端设计了导流板,用以引导气流均匀作用于肥料流,导流板夹角 α 为 30°。

红外光电传感器主要由光电发射端、光电接收端、传感器外壳和信号处理模块等组成,结构如图 3c 所示。流量传感器采用光电对射式,发射端包含 6 个并联的 5 mm 红外发光二极管(LED),每个 LED 串接限流电阻以均衡电流分布。接收端配置 6 个反向偏置的 5 mm 光电二极管并联,以提高信号采集灵敏度。光电元件均集成于自主设计的 40 mm × 8 mm PCB 基板,确保器件间距的精确控制。传感器

外径为 44 mm,壁厚为 2 mm,检测区域为 47 mm × 42 mm 的矩形,传感器高度为 60 mm。信号处理模块由前级跨阻放大电路和后级电压放大电路组成,如图 4 所示,传感器的光电接收端根据光通量产生相应的光电流,光电流通过两级放大电路将电流信号转换成电压信号,电压转换公式为

$$U_{\text{sensor}} = -R_1 \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right) I \tag{1}$$

式中 I ——光电接收端输出光电流, A
 U_{sensor} ——传感器输出电压, V
 R_1 、 R_3 ——反馈电阻, kΩ
 R_2 ——输入电阻, kΩ

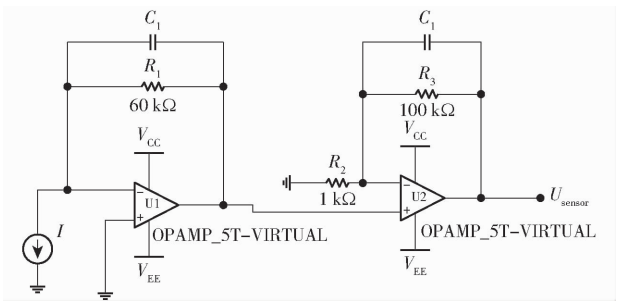


图 4 信号处理电路
Fig. 4 Signal processing circuit

2 检测模型构建

2.1 面元积分算法模型

颗粒肥料瞬时流量是指单位时间内施用的肥料质量。本文采用面元积分法^[27]计算颗粒肥流量,将料流按照运动方向划分为若干个断面,划分间隔由检测传感器的检测频率确定。分别计算各断面截面积,再转换为体积,通过求和单位时间内所有体积得到肥料流量,颗粒肥流量计算式为

$$Q(t) = \rho C \frac{1}{f_s} \sum_{j=1}^w S_j v \tag{2}$$

式中 Q ——颗粒肥瞬时流量, g/s
 ρ ——肥料颗粒密度, g/m³
 C ——肥料流体积分数, %
 S_j ——第 j ($j = 1, 2, \dots, w$, w 为单位时间内断面个数) 料流瞬时断面面积, m²
 v ——料流运动速度, m/s
 f_s ——传感器检测频率, Hz

假设气流辅助装置使肥料颗粒形成紧实的规则圆柱体料流,则肥料流的断面面积与肥料流量直接相关。肥料流量增大,肥料流的体积会增大,料流截面积也会增大。肥料流断面面积计算式为

$$S_j = \frac{\pi D^2}{4} \tag{3}$$

式中 D ——肥料流等效直径, m

由于料流截面无法直接与传感器响应电信号构成关系,因此,借助料流等效直径间接计算料流断面面积。传感器响应电压与肥料流等效直径间的映射关系为

$$D = f_1 (U_{\text{sensor}}) \tag{4}$$

由式(2)~(4)可知,当流速一定时,肥料流等效直径越大,肥料流量越大。流量增大会增加遮光量,光电传感器产生的响应电压越小。为明确传感器响应电压 U_{sensor} 与等效直径 D 之间的关系,采用静态试验方式分别采集不同料流等效直径的传感器响应电压,并通过数据拟合建立两者之间关系。

2.2 料流等效直径与传感器响应电压关系

采用静态试验方法构建流量转换模型,如图 5 所示。现有市场上的落肥管直径大多不超过 40 mm^[28],试验中设定多个肥管直径(10~35 mm)的储料容器,并在试验前将管内装满肥料。试验前,将试管口倒置,容器出口距离检测区域约 2 cm,并用硬板封堵防止肥料提前洒出。打开数据采集系统后抽离硬板,使肥料在重力作用下自由下落,经过光电传感器检测区域。肥料流量传感器采集频率为 1 kHz,每采集 10 个电压求平均值,最终输出至计算机,记录传感器响应电压。通过控制储料容器管径梯度获取传感器响应电压后,进行最小二乘线性回归分析。

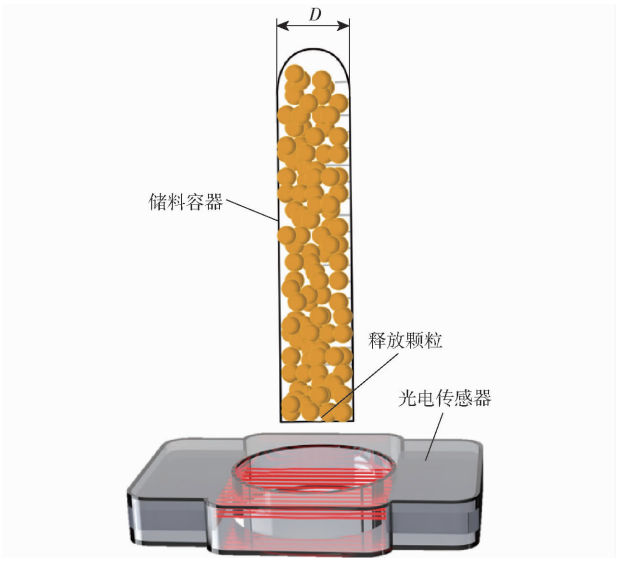


图 5 料流等效直径静态试验示意图
Fig. 5 Schematic of equivalent diameter static test of material flow

试验材料选用玉米施肥常用的磷酸二铵复合肥(云南云天化股份有限公司),容重为 1 490 kg/m³。通过静态试验获取不同直径料流下颗粒肥流量传感器的响应电压,根据散点图进行线性拟合,如图 6 所示,磷酸二铵颗粒肥响应电压与等效直径表征模型

(U-D 模型)拟合决定系数 R^2 为 0.987,表明传感器响应电压与料流等效直径之间存在较强的相关性。

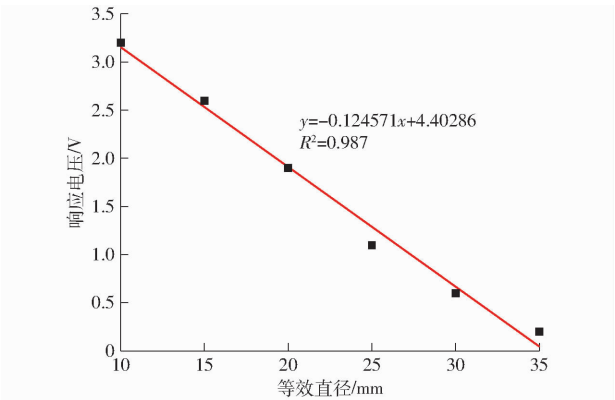


图 6 肥料等效直径检测模型

Fig. 6 Fertilizer equivalent diameter detection model

2.3 肥料颗粒运动及分布规律

颗粒料流动态分布特征对流量检测精度具有显著影响,因此对化肥颗粒在检测区域的分布规律和运动规律进行研究。颗粒肥料属于散粒体,利用 CFD-DEM 的气固耦合仿真框架分析气流辅助流场中散粒体肥料动态行为规律。

根据肥料三维建模法,随机选取 100 粒肥料颗粒,进行三轴尺寸测量。磷酸二铵平均长度为 3.68 mm,平均宽度为 3.45 mm,平均厚度为 3.22 mm,得出等效粒径和球形率,分别为 3.44 mm 和 93.50%。选用单球形模型进行颗粒建模,采用文献[29-30]参数校准方法对模型 DEM 参数进行了校准,仿真设置参考文献[31]。由于磷酸二铵肥料颗粒是非粘性,因此选择 Hertz-Mindlin(no slip)模型作为物理接触模型^[32]。

为方便分析肥料颗粒分布情况,以检测区几何

中心 O 为基准点构建笛卡尔三维正交观测坐标系,将检测区域沿 X 向和 Z 向划分为 10×10 结构化网格阵列(单元维度为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$),中心敏感区域大小为 4×4 网格阵列,如图 7 所示。基于体素包络的颗粒占有率判据,单网格最大粒子容纳数 $N_{\max}$ 为 1,对经过检测区和中心区的颗粒数量进行统计。试验变量选择进气口压力 ($0 \sim 5\,000 \text{ Pa}$),肥料流量为 50 g/s ,仿真时长为 5 s ,以颗粒料流中心汇聚程度(CVC)为评价指标,计算式为

CVC = \frac{N_c}{N_f} \times 100\% \tag{5}

其中 $N_c = \sum_{i=1}^k n_i^{center}$ $N_f = \max \left(\sum_{j=1}^m n_j^{grid} \right)$

- 式中 N_c ——中心敏感区域内颗粒总数
 N_f ——所有网格单元颗粒总数
 k ——中心敏感区域网格数
 m ——行列划分网格总数
 n_i^{center} ——第 i 步中心网格瞬时颗粒数
 n_j^{grid} ——第 j 步网格区域瞬时颗粒数

不同进气压力条件下颗粒汇聚程度如图 8 所示,由图 8 可知,进气压力为 $500 \sim 2\,500 \text{ Pa}$ 时中心汇聚程度为 $71.85\% \sim 76.99\%$,相对较高,作为后期试验工作参数。

统计网格区域内化肥颗粒在 Y 轴方向速度,结果如图 9 所示,在不同进气压力条件下,气流辅助装置的位置不同颗粒肥料运动速度存在显著差异。随着进气压力的增加,气流对颗粒的推动作用增强,进而颗粒的运动速度提高。此外,颗粒距离气缝口越远,加速过程持续时间和气流作用累积效应越大,导致颗粒运动速度进一步增加。

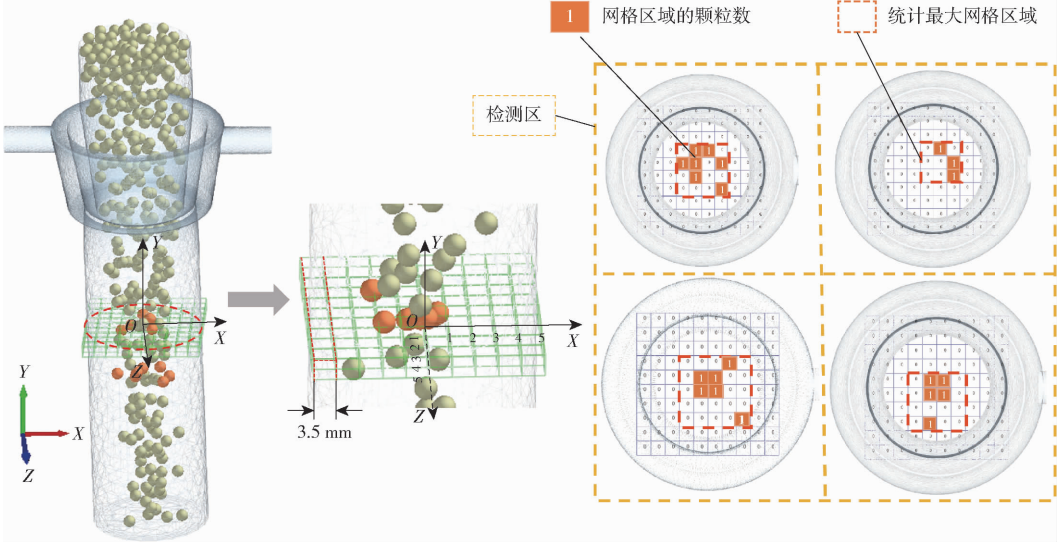


图 7 检测区域网格划分

Fig. 7 Grid division of inspection area

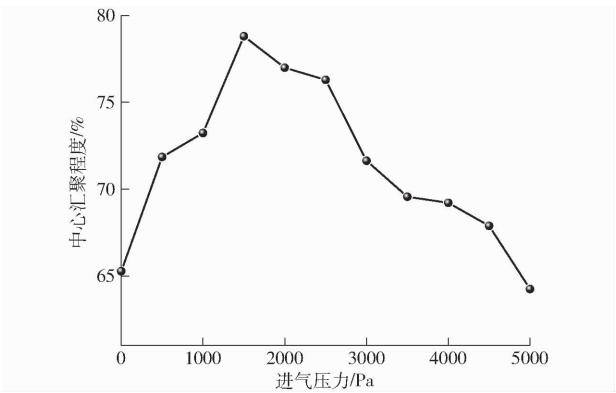


图 8 颗粒中心汇聚程度

Fig. 8 Particle distribution map

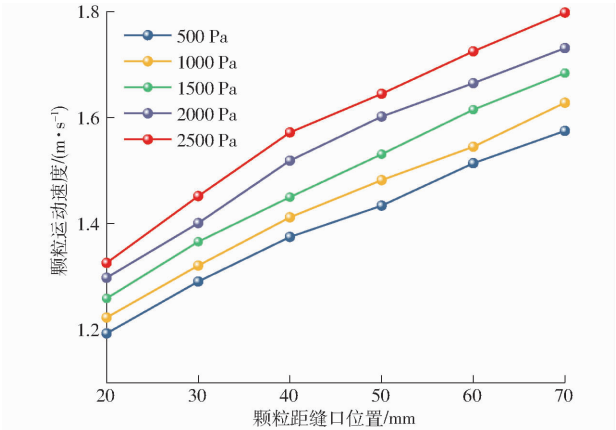


图 9 肥料颗粒 Y 轴运动速度

Fig. 9 Fertilizer particles Y-axis movement speed

3 台架试验

为了验证气流辅助光电式颗粒肥流量检测系统的性能,选用磷酸二铵作为试验材料,在北京市昌平区小汤山国家精准农业智能装备研究中心实验室开展气流辅助光电式颗粒肥流量检测系统台架试验。

3.1 试验准备

3.1.1 试验台架搭建

试验台架如图 10 所示,主要由供气系统、供肥系统、数据采集系统、流量检测系统组成,主要部件包括风机 (WS145110-48-150-X300 型)、变频器、直流电源 (48V-1500W)、电机控制器、肥箱、排肥器、气流辅助装置、流量检测传感器、电子秤 (量程 75 kg,精度 1 g)、接肥箱等,其中,排肥轮为直槽式 (直径 70 mm,长度 75 mm,槽数 6)。软件为流量监测软件系统。

3.1.2 模型标定

初始模型是以颗粒平均运动速度 1.5 m/s 和料流体积分数为 100% 的理想情况进行构建,然而,实际检测过程并非如仿真模拟和静态试验所设定的理想条件,如料流的紧实程度和运动速度恒定等,会导致测量结果的不准确。因此,采用称量法对检测模

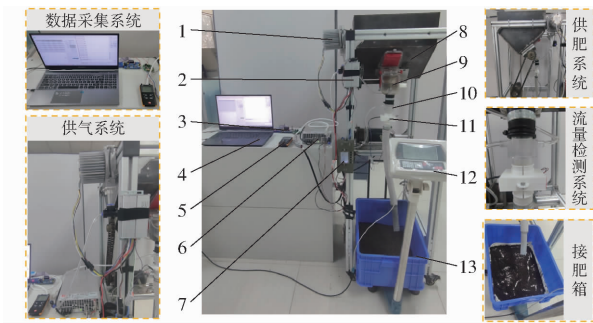


图 10 颗粒肥料流量检测试验台架

Fig. 10 Test rig for flow testing of granular fertilizers

1. 风机 2. 变频器 3. 流量监测软件系统 4. 计算机 5. 风压计 6. 直流电源 7. 电机控制器 8. 肥箱 9. 排肥器 10. 气流辅助装置 11. 流量检测传感器 12. 电子秤 13. 接肥箱

型标定,修正静态试验和仿真模拟构建的检测模型。选用磷酸二铵颗粒肥作为试验材料,检测传感器固定在距气缝口下方 30 mm 处,通过电机控制器改变排肥轴旋转速度改变肥料流量,排肥轴转速以 10 r/min 为步长,从 30 r/min 增加到 90 r/min,每个转速梯度持续 60 s,在每次排肥结束后,对接肥箱内的肥料进行称量,重复试验 3 次。将传感器检测的累计施肥量与称量的实际施肥量进行对比,将比值作为检测模型修正系数。

采用多元回归模型对进气压力和排肥轴转速与修正系数之间相关性进行建模分析。模型中各项参数均通过显著性检验 ($P < 0.05$),修正系数估测模型为

$$K = 0.385 - 0.000\,030\,4p + 0.007n \quad (6)$$

式中 K ——修正系数

p ——进气压力,Pa

n ——排肥轴转速,r/min

拟合出修正系数估测模型决定系数 R^2 和 RMSE 分别为 0.937 和 0.001 5,说明修正系数估测模型能够有效估测不同进气压力和转速模型修正系数。

3.2 试验方案

为了探究气流辅助装置的有效性,开展有无气流辅助装置的对比试验。另外,为评估 U-V-Q 检测模型的可靠性,进行不同检测模型对比试验。

玉米化肥施用量一般为 200 ~ 600 kg/hm²,排肥挡板开度固定为 5 mm,据此设置 7 个排肥轴转速梯度,对应排肥量分别为 30 r/min (30.57 g/s)、40 r/min (38.54 g/s)、50 r/min (45.78 g/s)、60 r/min (54.45 g/s)、70 r/min (67.01 g/s)、80 r/min (74.53 g/s) 和 90 r/min (84.12 g/s)。进气压力根据仿真试验结果设置 5 个梯度,分别为 500、1 000、1 500、2 000、2 500 Pa。

为了匹配电子秤的采样周期,使肥料流量采集

系统每 1 s 输出一次检测的肥料流量与累计施肥量,每个转速下持续试验 30 s,重复 3 次。最后将电子秤称量的数据与肥料流量检测系统采集的数据进行对比。

在检测精度验证试验中,电子秤动态称量数据作为实际排肥量。由于电子秤检测时间相对于检测传感器检测时间存在时间滞后,因此选择对每 5 s 的数据求取平均作为检测排肥流量和实际排肥流量,同时剔除电机启停时数据。为了量化检测装置检测精度,以平均绝对百分比误差和均方根误差作为评价指标,同时引入标准差平均值作为检测稳定性的评价指标。

平均绝对百分比误差 (MAPE) 计算公式为

$$MAPE = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \left| \frac{Q_m - Q_f}{Q_f} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中 n_1 ——样本个数,取 18

Q_m ——检测装置检测肥流量,g/s

Q_f ——电子秤检测肥流量,g/s

均方根误差 (RMSE) 计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (Q_m - Q_f)^2} \quad (8)$$

标准差平均值 (MSD) 计算公式为

$$MSD = \sqrt{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} (Acc - \overline{Acc})^2} \quad (9)$$

其中 $Acc = \left(1 - \left| \frac{Q_m - Q_f}{Q_f} \right| \right) \times 100\%$

式中 Acc ——准确率,%

3.3 结果与分析

3.3.1 检测精度试验

试验条件参照 3.2 节,颗粒肥流量检测装置不同条件下检测结果如表 1 所示。

由表 1 可知,在不同进气压力和排肥器转速条件下,各工况肥流量平均绝对百分比误差 (MAPE) 不大于 4.55%,均方根误差 (RMSE) 不大于 3.82 g/s,表明该流量检测装置在整个检测范围内具有良好的检测精度。为了分析排肥轴转速和进气压力之间的交互作用,使用 Design-Expert 13 软件对排肥轴转速 A (30 ~ 90 r/min) 7 水平和进气压力 B (500 ~ 2 500 Pa) 5 水平开展全因子试验,重复 3 组,共 105 组试验,方差分析结果如表 2 所示。

由表 2 可知,影响气流辅助光电式颗粒肥流量检测系统的平均绝对百分比误差的主次因素顺序为 B 、 A 、 AB 。为了更加直观地说明各试验因素水平对试验指标的影响,利用 Origin 软件绘制热力图,如图 11 所示。当进气压力为 1 000 Pa 时,检测系统 MAPE 不超过 3.17%,达到最稳定检测效果。

表 1 颗粒肥流量检测装置不同条件下的检测结果

Tab.1 Detection results of granular fertilizer flow detection device under different conditions

排肥 轴转速/ (r·min ⁻¹)	进气 压力/ Pa	检测 平均值/ (g·s ⁻¹)	实际 平均值/ (g·s ⁻¹)	平均绝对 百分比误 差/%	均方 根误差/ (g·s ⁻¹)
30	500	30.85	31.92	3.34	1.21
	1 000	27.51	27.61	1.95	0.65
	1 500	32.38	32.03	2.36	0.89
	2 000	30.44	31.50	3.57	1.24
	2 500	26.86	27.87	3.91	1.23
40	500	45.58	43.61	4.55	2.10
	1 000	34.04	34.00	1.53	0.61
	1 500	38.43	39.11	1.98	0.91
	2 000	38.72	38.24	2.82	1.25
	2 500	39.37	38.10	3.36	1.36
50	500	55.54	56.15	1.54	1.13
	1 000	42.32	43.29	3.17	1.70
	1 500	47.55	47.98	1.22	0.79
	2 000	38.50	39.83	3.34	1.38
	2 500	46.54	45.52	2.24	1.12
60	500	64.49	66.28	2.73	1.97
	1 000	53.41	54.56	2.48	1.57
	1 500	54.00	55.03	2.42	1.55
	2 000	51.72	50.58	2.48	1.48
	2 500	50.82	52.19	2.93	1.76
70	500	75.61	76.50	1.30	1.17
	1 000	64.63	64.82	1.24	1.02
	1 500	66.80	67.92	3.00	2.33
	2 000	59.06	57.77	2.24	1.44
	2 500	62.66	61.69	2.06	1.43
80	500	80.44	84.09	4.31	3.82
	1 000	82.88	83.72	1.51	1.59
	1 500	77.56	79.01	1.95	1.87
	2 000	65.83	66.88	1.69	1.25
	2 500	70.05	70.70	1.15	1.05
90	500	90.24	93.64	3.63	3.64
	1 000	96.04	95.97	2.06	2.24
	1 500	81.52	84.50	3.49	3.44
	2 000	77.66	80.62	3.64	3.29
	2 500	80.20	81.25	1.98	1.94

表 2 方差分析结果

Tab.2 Results of ANOVA

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	87.10	34	2.56	4.90	<0.000 1***
<i>A</i>	16.09	6	2.68	5.13	0.000 2***
<i>B</i>	14.46	4	3.61	6.92	<0.000 1***
<i>AB</i>	56.55	24	2.36	4.51	<0.000 1***
纯误差	36.57	70	0.522 4		
总变异	123.67	104			

注:*** 表示在 0.001 水平差异极显著。

MAPE 较高出现在进气压力为 500 Pa 时,主要原因

在于:当进气压力较低(低于 500 Pa)时,气流电力不足以维持稳定的料流;而当进气压力较高(高于 2 000 Pa)时,过大的气流作用力导致颗粒运动轨迹紊乱,形成湍流干扰,从而影响检测精度,尤其是在排肥轴转速较低的情况下更为明显。

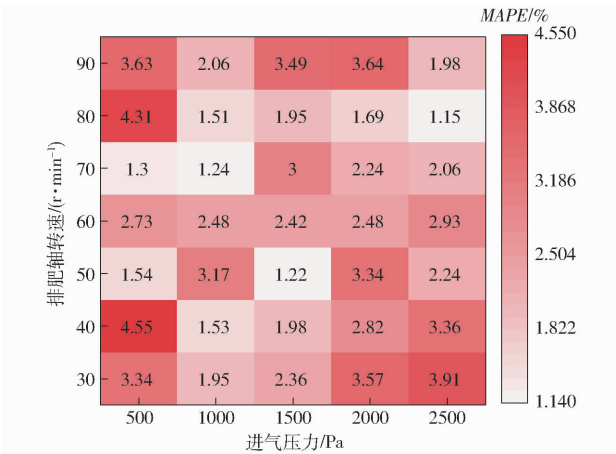


图 11 不同工况下检测情况热力图

Fig. 11 Heat map of detection situation under different working conditions

3.3.2 有无气流辅助装置试验

为深入探究气流辅助装置对流量检测系统的影响,对无气流辅助装置下检测系统进行试验。试验条件保持一致,仅将原有的环隙气流辅助装置替换为透明直管,以模拟无气流辅助状态。颗粒肥流量检测系统试验结果如图 12 所示。

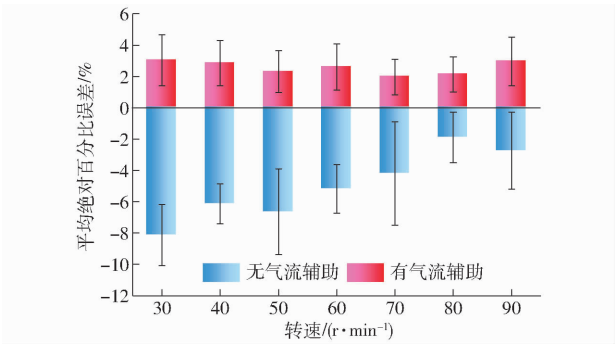


图 12 有无气流辅助的 U - V - Q 检测模型试验结果

Fig. 12 Experiment results of U - V - Q detection models with and without airflow assistance

由图 12 可知,在无气流辅助条件下,U - V - Q 检测模型的 MAPE 保持在 8.12% 以下,MSD 控制在 3.30% 以内。有气流辅助装置系统整体 MAPE 降低 2.44%,MSD 降低 0.74%,表明气流辅助显著提升检测精度。另外,试验数据显示,随着排肥轴转速的增加,检测误差逐步减小,标准差逐渐减小,检测误差最大且标准差最大出现在排肥轴转速为 30 r/min 时,主要原因在于无气流辅助装置时,肥料颗粒在检测区域分布不均匀且形态不稳定,导致料流体积转换过程存在不稳定性,进而影响 U - V - Q 检测模型

的准确性和稳定性。随着排肥轴转速的提升,肥料流量增大,检测区域肥料颗粒密度增加,呈现相对稳定的分布规律,有利于 U - V - Q 检测模型实现肥料流量的准确测量。

3.3.3 检测模型试验

为了探明气流辅助条件下 U - V - Q 检测模型和传统检测模型对颗粒肥料质量流量的检测情况,进行了模型对比试验。通过标定试验分别获取了不同流量下的颗粒流量传感器响应电压与排肥流量数据,对其进行线性拟合得到基于传感器响应电压与肥料流量之间的转换模型(U - Q 检测模型)。拟合结果如图 13 所示,拟合决定系数 R^2 为 0.995。

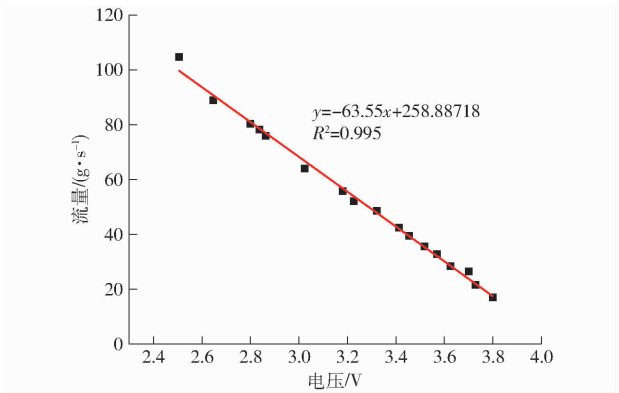


图 13 传感器响应电压与化肥流量关系曲线

Fig. 13 Sensor response voltage versus fertilizer flow rate curve

图 14 为各模型检测误差,由图 14a 可知,在气流辅助条件下,不同排肥轴转速 U - V - Q 检测模型

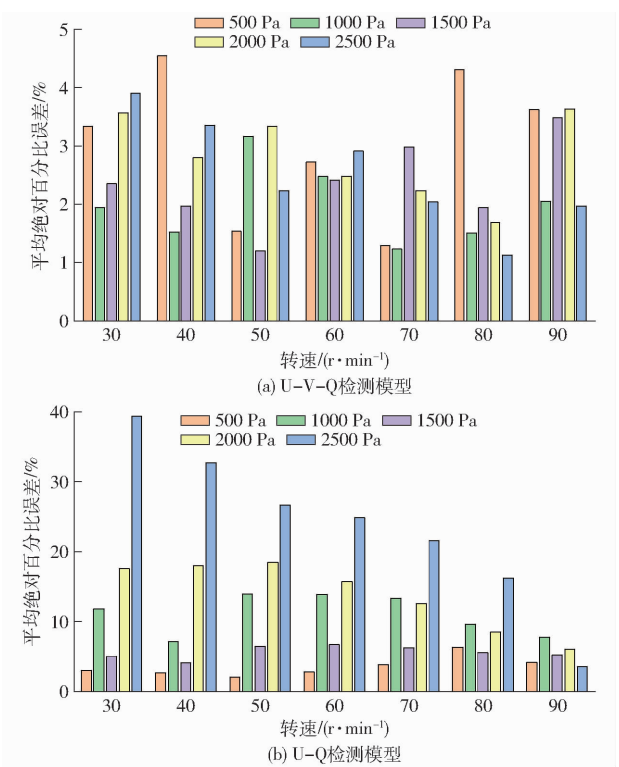


图 14 各模型检测误差

Fig. 14 Detection error for each model

MAPE 平均值较 U-Q 模型降低 9.03%。在不同排肥轴转速工况条件下,U-V-Q 检测模型的 MAPE 均小于 U-Q 检测模型。原因在于气流辅助装置对料流有聚拢塑形效果,肥料颗粒的聚集,使得颗粒相互遮挡,反而不利于 U-Q 模型的检测。由图 14b 可知,U-Q 检测模型的检测精度在不同进气压力下存在显著差异。当进气压力为 500 Pa 时,系统达到要求的检测状态,不同转速条件的 MAPE 平均值稳定在 2.11%~6.36%。原因是气流辅助装置使肥料颗粒均匀通过检测区域中心,避免颗粒偏向传感器一侧,从而减少测量误差。然而,随着进气压力的增加,检测精度逐渐下降,当增至 2 500 Pa 时,U-Q 检测模型检测效果显著下降,特别是在排肥轴转速为 30 r/min 时,MAPE 最高达到 39.41%。这一现象表明,U-Q 检测模型在较高进气压力下,无法有效进行小流量检测。主要原因在于较大的进气压力会显著影响颗粒肥在检测区域的分布状态,导致其与标定时的模型不一致,从而造成检测误差增大。此外,随着排肥轴转速增加,U-Q 检测模型 MAPE 逐渐减小,表明气流辅助装置对 U-Q 检测模型在大流量检测时有积极影响。

4 结 论

(1)设计了一种气流辅助光电式颗粒肥流量检测传感器,利用环隙式气流辅助装置对颗粒料流进行流形重构,使肥料在检测区域的中心汇聚。设计

了对射式红外光电传感器,搭建了气流辅助光电式颗粒肥流量检测系统。以磷酸二铵为试验材料,以排肥轴转速和进气压力为试验因素对检测系统进行验证。

(2)提出一种基于气流辅助的颗粒肥流量光电检测方法。基于面元积分法,引入料流体积作为中介变量,采用仿真模拟与静态试验相结合的方式,构建光电信号、料流体积和肥料流量之间的转换模型。通过静态试验确定了光电传感器响应电压与料流等效直径间的线性关系,决定系数为 0.987。通过标定试验建立了不同进气压力和排肥轴转速与修正系数之间的多元回归关系模型,回归模型决定系数为 0.937。

(3)开展系统性能验证试验。在不同的进气压力与排肥轴转速下,气流辅助装置下 U-V-Q 检测系统 MAPE 不超过 4.55%,RMSE 不大于 3.82 g/s,说明流量检测系统在流量 30~90 g/s 范围内具有较高的检测精度。相较于无气流辅助装置,有气流辅助装置的系统 MAPE 降低 2.44%,MSD 降低 0.74%,表明气流辅助能有效降低检测误差以及稳定性。在有气流辅助的情况下,与 U-Q 检测模型相比,MAPE 降低 9.03%,表明了单独采用气流辅助或使用 U-V-Q 检测模型都难以获得理想检测效果,而将气流辅助技术和 U-V-Q 检测模型相结合,能够显著提高颗粒肥流量检测精度和稳定性。

参 考 文 献

- [1] 王楠,庄卫东. 变量施肥技术的研究现状与发展建议[J]. 现代化农业, 2024(3): 77-79.
WANG Nan, ZHUANG Weidong. Research status and development recommendations for variable fertilization technology[J]. Modernizing Agriculture, 2024(3): 77-79. (in Chinese)
- [2] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 槽轮结构参数对直槽轮式排肥器排肥性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 12-20.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Influences of structure parameters of straight flute wheel on fertilizing performance of fertilizer apparatus[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 12-20. (in Chinese)
- [3] 杨立伟,黄家运,张季琴,等. 基于微波多普勒法的施肥质量流量检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 210-217.
YANG Liwei, HUANG Jiayun, ZHANG Jiqin, et al. Mass flow measurement system of granular fertilizer based on microwave doppler method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 210-217. (in Chinese)
- [4] 姜萌,刘彩玲,都鑫,等. 基于光量阻挡原理的颗粒化肥流量检测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 2): 91-99.
JIANG Meng, LIU Cailing, DU Xin, et al. Flow detection mechanism of granular fertilizer based on light blocking principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 91-99. (in Chinese)
- [5] 翟长远,杨硕,王秀,等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 1-20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 1-20. (in Chinese)
- [6] ZHENG Y, LIU Q. Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids[J]. Measurement, 2011, 44(4): 589-604.
- [7] 丁永前,刘卓,陈冲,等. 基于动态称量原理的泛函式播种施肥量检测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 146-154.

- DING Yongqian, LIU Zhuo, CHEN Chong, et al. Functional detection method of application rate based on principle of dynamic weighing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 146–154. (in Chinese)
- [8] 张国忠, 赵状状, 刘浩蓬, 等. 铰链杠杆式肥箱排肥量监测系统设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 270–276.
- ZHANG Guozhong, ZHAO Zhuangzhuang, LIU Haopeng, et al. Design and test of the monitoring system for the fertilizer discharge of hinged lever type fertilizer box[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 270–276. (in Chinese)
- [9] 杨立伟, 赵礼豪, 张俊宁, 等. 基于微波传感的颗粒肥料质量流量测量方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 323–329.
- YANG Liwei, ZHAO Lihao, ZHANG Junning, et al. Particle fertilizer mass flow measurement based on microwave method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 323–329. (in Chinese)
- [10] HAN J, WANG X T, ZHOU X, et al. Granular fertilizer mass prediction for electric fertilizer distribution device based on RANSAC[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(4): 7917–7925.
- [11] 周利明, 马明, 苑严伟, 等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 44–51.
- ZHOU Liming, MA Ming, YUAN Yanwei, et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 44–51. (in Chinese)
- [12] 苏清茂. 基于电容法的油菜直播机颗粒肥检测装置设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学 2023.
- SU Qingmao. Design and experiment of granular fertilizer detection device for oilseed rape direct seeding [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [13] BACK S W, YU S H, KIM Y J, et al. An image-based application rate measurement system for a granular fertilizer applicator [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(2): 679–687.
- [14] SWISHER D, BORGEIT S, SUDDUTH K. Optical sensor for granular fertilizer flow rate measurement[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2002, 45(4): 881–888.
- [15] How does clarity work? [EB/OL]. Precision Planting. [2025–02–12]. <http://www.precisionplanting.com/products/dry-fertilizer-applicators/clarity>.
- [16] 农峰, 徐春保, 李强, 等. 油菜机直播颗粒肥分流有序并行检测装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(21): 18–28.
- NONG Feng, XU Chunbao, LI Qiang, et al. Sequential parallel detection device for the granular fertilizer of rape mechanical direct seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(21): 18–28. (in Chinese)
- [17] 和贤桃, 杨帆, 杨丽, 等. 颗粒化肥流量传感器、排肥方法及变量施肥系统: CN115574878. A[P]. 2023–01–06.
- [18] JIANG Meng, LIU Cailing, DU Xin, et al. Research on continuous granular material flow detection method and sensor[J]. Measurement, 2021, 182: 109773.
- [19] 贾洪雷, 温翔宇, 王刚, 等. 颗粒肥料质量流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 130–136.
- JIA Honglei, WEN Xiangyu, WANG Gang, et al. Design and experiment of mass flow sensor for granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 130–136. (in Chinese)
- [20] GRIFT T E. Mass flow measurement of granular materials in aerial application-part 1: simulation and modeling [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2001, 44(1): 19–26.
- [21] 安晓飞, 付兴兰, 孟志军, 等. 光电信号与收割机谷物产量数据转换模型的构建与验证[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 36–41.
- AN Xiaofei, FU Xinglan, MENG Zhijun, et al. Grain yield data transformation model based on photoelectric principle and its validation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 36–41. (in Chinese)
- [22] 付兴兰, 张兆国, 安晓飞, 等. 光电漫反射式联合收割机谷物产量计量系统研发与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 24–30.
- FU Xinglan, ZHANG Zhaoguo, AN Xiaofei, et al. Development and performance experiment on grain yield monitoring system of combine harvester based on photoelectric diffuse reflectance[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 24–30. (in Chinese)
- [23] 郭春江. 基于单线激光雷达的变量施肥机排肥量测量系统设计与开发[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- GUO Chunjiang. Design and development of a fertilizer flow measurement system based on single-line LiDAR [D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [24] ZHANG S, ZHU H, WANG W, et al. Design and optimization test of high-speed seed guide device with conical spiral airflow [J]. Engenharia Agrícola, 2024, 44: e20230131.
- [25] 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)
- [26] 辛明金, 张曼, 朱仰昆, 等. 超大颗粒肥水田气力深施加速器设计及参数优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 43–52.
- XIN Mingjin, ZHANG Man, ZHU Yangkun, et al. Design and parameter optimization of the accelerator for pneumatic deep application of super-large fertilizer granule in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(8): 43–52. (in Chinese)

Chinese)

- [27] 于海里, 孙立超, 左胜, 等. 基于双激光雷达的带式输送机煤流量检测系统[J]. 工矿自动化, 2023, 49(7): 27–34, 59.
YU Haili, SUN Lichao, ZUO Sheng, et al. Coal flow detection system for belt conveyor based on dual LiDAR[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(7): 27–34, 59. (in Chinese)
- [28] 苑进, 刘勤华, 刘雪美, 等. 多肥料变比变量施肥过程模拟与排落肥结构优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 81–87.
YUAN Jin, LIU Qinhua, LIU Xuemei, et al. Granular multi-flows fertilization process simulation and tube structure optimization in nutrient proportion of variable rate fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 81–87. (in Chinese)
- [29] DING X, WANG B, HE Z, et al. Fast and precise DEM parameter calibration for *Cucurbita ficifolia* seeds[J]. Biosystems Engineering, 2023, 236: 258–276.
- [30] SHI Q, WANG B, MAO H, et al. Calibration and measurement of micrometre-scale pollen particles for discrete element method parameters based on the Johnson–Kendal–Roberts model[J]. Biosystems Engineering, 2024, 237: 83–91.
- [31] LIU J S, GAO C Q, NIE Y J, et al. Numerical simulation of fertilizer shunt-plate with uniformity based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105737.
- [32] 刘晓东, 王绪坪, 陈礼源, 等. 油菜直播机分层定量施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 1–10.
LIU Xiaodong, WANG Xuping, CHEN Liyuan, et al. Design and experiments of layered and quantitative fertilization device for rapeseed seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 1–10. (in Chinese)

(上接第 56 页)

- [16] 陈亮, 刘敬辉, 陈江平, 等. 两相流喷射器流动模型研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 26–31.
CHEN Liang, LIU Jinghui, CHEN Jiangping, et al. Model investigation of jet flow inside two-phase ejector[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(2): 26–31. (in Chinese)
- [17] 向清江, 杜春伟, 张贡赫, 等. 气固喷射器的干粉喷洒试验及喉嘴距尺寸[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(5): 493–498.
XIANG Qingjiang, DU Chunwei, ZHANG Gonghe, et al. Dry powder spraying experiment of gas-solid ejector and size of nozzle-throat distance[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(5): 493–498. (in Chinese)
- [18] 王宝山. 小粒径种子兼用精量穴播集排系统设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
WANG Baoshan. Design and experiment of precision hill-seeding centralized metering system for small particle size seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [19] 陆宏圻. 喷射技术理论及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [20] 刘鹤年, 刘京. 流体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [21] 王磊, 廖宜涛, 万星宇, 等. 油麦兼用型气送式集排器混种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 68–79, 97.
WANG Lei, LIAO Yitao, WAN Xingyu, et al. Design and test on mixing component of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 68–79, 97. (in Chinese)
- [22] 王庆朋, 刁凯欣, 郑淑月, 等. 球体与平板斜碰撞后运动状态的研究[J]. 机械设计, 2022, 39(12): 31–38.
WANG Qingpeng, DIAO Kaixin, ZHENG Shuyue, et al. Research on motion state of sphere oblique impact with planar surface[J]. Journal of Machine Design, 2022, 29(12): 31–38. (in Chinese)
- [23] 路晓鹏. 斜碰撞现象的非线性动力学研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
LU Xiaopeng. Research on dynamics of oblique collision phenomenon[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [24] 王磊. 油麦兼用型宽幅高速气送式播种机关键部件设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
WANG Lei. Design and experiment on broad width and high speed air-assisted planter for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [25] 廖庆喜, 沈文惠, 王磊, 等. 油菜高速机械离心式集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 154–167.
LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, WANG Lei, et al. Design and experiment of high-speed mechanical centrifugal centralized seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 154–167. (in Chinese)
- [26] 王宝山, 王磊, 廖宜涛, 等. 小粒径种子精量穴播集排器型孔轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 64–75, 119.
WANG Baoshan, WANG Lei, LIAO Yitao, et al. Design and test of seeding wheels of precision hill-seeding centralized metering device for small particle size seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 64–75, 119. (in Chinese)