

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.011

基于光量阻挡原理的颗粒化肥流量检测方法

姜 萌 刘彩玲 都 鑫 李方林 周智智
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对化肥排施过程流量较大,化肥颗粒相互遮挡导致难以准确检测的问题,提出了基于光量阻挡原理的颗粒化肥流量检测方法,该方法以颗粒流量与传感器响应电压间的相关性为基础建立检测模型;通过理论分析初步确定了该检测方法的可行性;借助离散元仿真分析了化肥排施过程在输肥管中的分布规律,为颗粒流量传感器结构设计和安装位置确定提供了依据;基于上述分析设计了颗粒流量传感器,并搭建了颗粒化肥流量检测试验台;以尿素和复合肥为试验材料,以排肥轮转速为试验因素对上述理论进行了验证,结果表明化肥流量与化肥颗粒流量传感器累计响应电压存在较强的线性相关,各排肥轮转速下,两者相关性决定系数均高于0.992。为确定最优检测模型,建立了各排肥轮转速的检测模型,以平均绝对百分比误差为指标对不同检测模型进行了对比,基于加速组建立的检测模型对尿素和复合肥的平均绝对百分比误差分别为5.18%和4.07%,检测误差低于其他组,确定了最优检测模型。为解决颗粒流量传感器与不同直径输肥管匹配的问题,以敏感元件数量和颗粒流量传感器内径为因素进行试验,结果表明当检测元件密度为0.075~0.75时,对于尿素和复合肥各流量传感器的平均绝对百分比误差分别为4.75%~9.33%和4.07%~9.11%,且平均绝对百分比误差随检测元件密度增大而降低。

关键词: 农业机械;施肥;传感器;流量检测;光量阻挡原理

中图分类号: S223.2*5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0091-09

Flow Detection Mechanism of Granular Fertilizer Based on Light Blocking Principle

JIANG Meng LIU Cailing DU Xin LI Fanglin ZHOU Zhizhi
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In agricultural production, it is challenging to detect the flow rate of fertilization due to the large amount and the mutual shielding of fertilizer particles. A granular fertilizer flow detection method based on the principle of luminous flux blocking was proposed to solve this problem. The feasibility of the detection method was preliminarily determined by theoretical analysis; discrete element simulation was used to analyze the distribution of granular fertilizer discharge in the conveying tube, which provided a basis for the structural design and installation position of the particle flow detection sensor (PFDS). Based on the above analysis, the PFDS and test-bench were designed. Experiments were carried out by selecting urea and compound fertilizer as materials and the fertilizer discharging wheel (FDW) speed as factors to verify the method. The results showed a strong linear correlation between fertilizer flow and the cumulative response voltage of PFDS. Under different fertilization frequencies, the correlation determination coefficient (R^2) of both was higher than 0.992. The detection models of each fertilizer frequency were established. Absolute percentage error (AE) and mean absolute percentage error (MAPE) were selected as the index. The MAPE of the detection model based on the “accelerate” for urea and compound fertilizer were 5.18% and 4.07%, respectively. And the detection error was lower than that of others, so the establishment method of the optimal detection model was determined. To solve the matching problem between the PFDS and fertilizer tube with different diameters, the experiments were carried out by taking the number of sensitive elements and the inner diameter of the PFDS as factors. The

results showed that when the density of detection elements was 0.075 ~ 0.75, the MAPE range for urea and compound fertilizer were 4.75% ~ 9.33% and 4.07% ~ 9.11%, respectively, and the MAPE was decreased with the increase of detection element density. The detection method would provide technical support and solutions for granular fertilizer flow detection.

Key words: agricultural machinery; fertilization; sensors; flow detection; light blocking principle

0 引言

施肥是农业生产中不可缺少的增产措施,科学施用化肥可培肥地力,改善土壤理化性质,提高农作物产量,对保障粮食安全和实现农业可持续发展意义重大^[1]。实时检测化肥流量以准确掌握化肥施用量是实现科学施肥的前提,是实现配方施肥作业的基础^[2-3],因此开展化肥流量检测方法研究有重要意义^[4]。

颗粒化肥流量检测主要分为直接和间接检测两种方式,间接检测方式通过检测排肥轮转动圈数和每转排肥量估算累计施肥量^[5],但化肥充满系数随含水率、转速变化,导致该方法精度不高;或在肥箱底部安装质量传感器,通过检测肥箱的质量变化反映施肥量^[6],该方法需要在肥箱设计时预留安装位置,否则后期改装工作量较大;ZHAO等^[7]采用单线激光雷达或摄像头扫描肥箱内化肥分布面得到化肥体积,进而通过体积密度计算得到化肥质量。

直接检测方式以排出化肥为检测对象,通常有图像法、静电法、声学法、电容法、称量法、微波法和光电法等^[8]。图像法分为数码成像和微波层析成像,BACK等^[9]借助数码相机采集化肥下落图像,首先分离化肥颗粒和背景,之后通过相关算法获取颗粒数量和直径,进而对施肥流量进行估算;ZOU等^[10]设计了阵列式微波层析成像传感器,通过该传感器获取管道内颗粒分布图像和移动速度;综上所述图像法计算量大对控制器要求较高且价格昂贵。静电法利用颗粒下落时摩擦产生静电的特点进行检测,颗粒带电量会随空气湿度产生变化,因此适合在较为干燥的情况下使用^[11]。电容法根据被测化肥与空气介电常数的差异,实现对施肥流量检测^[12]。称量法主要使用平衡梁压力传感器对排肥器排出化肥进行称量,余洪峰等^[13]设计了基于皮带秤的施肥性能检测系统,用于在实验室内施肥机性能的检测;TARUNA等^[14]使用称量传感器设计了施肥量快速检测系统,但该检测系统容易受到振动影响。

微波法根据散粒体流量与返回波信号的能量存在线性相关的特性对其进行检测,杨立伟等^[15]构建了基于微波多普勒雷达的施肥流量检测系统,相对检测误差在5.00%以内。声学法分为主动声波与

被动声波法,主动声波法利用声波信号强度随颗粒浓度衰减的特性进行检测,通常分别在被测管道两侧安装声波发生端与接收端^[16];被动声波法利用被测颗粒与钢板等材质碰撞发声,声接收器根据声波强度与频率确定物料流量^[17];实践表明声波法检测精度受环境影响较大^[18],因此使用范围受限。光电法应用范围广泛,金鑫等^[19]采用红外传感器检测输肥管的堵塞,由于颗粒相互遮挡,未能实现施肥量的检测;针对该问题,文献[20-21]提出了种流重构原理用于条播大播种量的检测,但该方法破坏了种流的有序列;姜萌等^[22]使用阈值划分方法实现对1~3粒重叠种子的识别;为实现对水稻穴粒数检测,王在满等^[23]设计了面源式光电传感器,通过脉冲宽度判别种子数量,穴粒数平均检测误差为7.99%~24.07%。

本文提出基于光量阻挡原理的颗粒化肥流量检测方法,该方法重点关注颗粒化肥引起的传感器电压变化量,通过理论推导和试验结合的方法,明确并建立化肥流量与传感器响应电压之间的相关性,进而以相关性为基础建立检测模型,并根据传感器响应电压实时反映排肥流量。分析颗粒化肥排出过程在输肥管中的分布规律,设计颗粒流量传感器并搭设试验台架,通过台架试验验证颗粒流量传感器响应电压与化肥流量的相关性,明确排肥轮转速、检测模型、检测元件数量、输肥管直径对检测精度的影响规律。

1 检测原理与传感器设计

1.1 检测原理

为确定颗粒化肥流量与颗粒流量检测传感器响应电压的关系,设计监测电路如图1所示,主要包括发射端、接收端、电源、电阻及采样模块,为保证各发射LED两端电压一致,发射端采用并联连接;为提高接收端敏感度,接收端串联连接。假设化肥在输肥管中分布稳定,则红外光线垂直于化肥颗粒流动方向入射时,颗粒流对入射光线产生一定面积遮挡,见图1a,若化肥流量为 Q ,则遮光面积为

$$A = f_1(Q) \quad (1)$$

式中 A ——化肥颗粒流动形成的等效遮光面积, m^2

f_1 ——颗粒流量与遮挡面积的映射关系

发射端发光强度不变时,其中光通量 P 与照射面积成正比^[24],设其映射关系为 f_2 ;然而光通量难以借助常规手段进行测量,当红外接收端采用反接形式时,其等效阻值与光通量呈负相关,并假设其映射关系为 f_3 ,则红外接收端等效阻值为

$$R_L = f_3(P) = f_3 f_2 f_1(Q) \quad (2)$$

$$P = f_2(A) = 2AI \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

式中 I ——红外发射端发光强度,cd

α ——红外光发散角, ($^\circ$)

R_L ——红外接收端等效电阻, Ω

简化图 1a 中红外接收端电路,如图 1b 所示,根据欧姆定律,红外接收端电阻为

$$R_L = \left(\frac{U}{U_D} - 1 \right) R_D \quad (4)$$

式中 U ——红外接收端供电电压, V

U_D ——电阻 R_D 两端电压, V

式(4)中 R_D 为已知量,但 U_D 可通过模数转换获得,因此通过式(1)~(4)建立颗粒流量 Q 与电压 U_D 关系模型为

$$U_D = U \frac{1}{1 + \frac{f_3 f_2 f_1(Q)}{R_D}} \quad (5)$$

式(5)中 f_1, f_3 未知,为明确颗粒流量 Q 与传感器响应电压 U_D 间关系,借助台架试验分别采集颗粒流量与传感器响应电压,通过数据拟合建立两者关系模型。

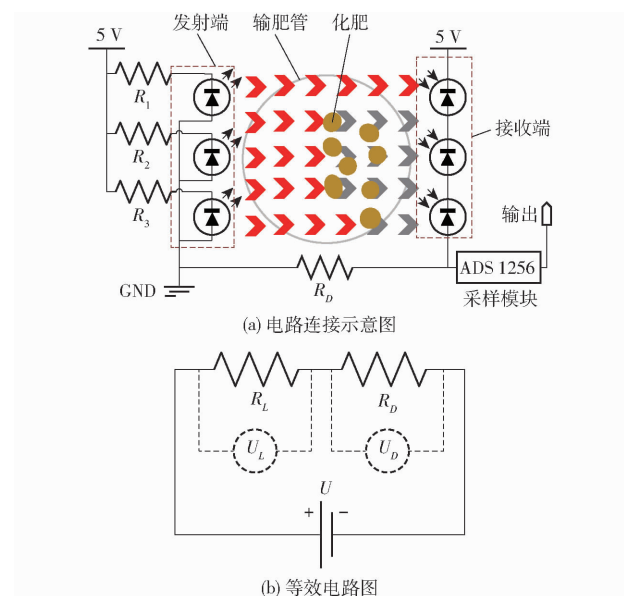


图 1 检测原理示意图

Fig. 1 Schematics of detection principle

1.2 传感器设计

设计颗粒流量传感器如图 2 所示。为使红外光线均匀地分布于检测截面,选用直径为 3 mm 的红外 LED 对射传感器,相邻传感器间隔为 4 mm;红外发射与接收端均呈“一”字型排列;参考市场通用施肥管直径为 30 mm,设计传感器内径为 30 mm,检测截面为 35 mm × 45 mm 矩形,传感器高度为 65 mm。

外 LED 对射传感器,相邻传感器间隔为 4 mm;红外发射与接收端均呈“一”字型排列;参考市场通用施肥管直径为 30 mm,设计传感器内径为 30 mm,检测截面为 35 mm × 45 mm 矩形,传感器高度为 65 mm。

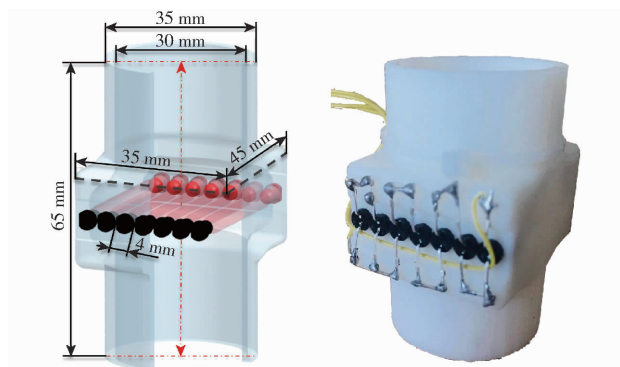


图 2 传感器结构及参数

Fig. 2 Sensor structure and parameters

1.3 颗粒化肥输送过程分布规律

颗粒化肥属于散粒体,一般采用离散单元法分析散粒体的运动^[25-26],根据颗粒间的接触力,通过一系列计算追踪系统中每个颗粒。在离散元系统中,颗粒运动符合牛顿第二定律,其运动方程为

$$\begin{cases} m_i \frac{dv_{p,i}}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{n,ij} + F_{t,ij}) \\ J_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_i + T_r + T_n) \end{cases} \quad (6)$$

式中 i, j, n ——颗粒编号

m_i ——颗粒 i 质量, kg

$v_{p,i}$ ——颗粒 i 速度, m/s

$F_{n,ij}$ ——作用在颗粒 i 上的法向力, N

$F_{t,ij}$ ——作用在颗粒 i 上的切向力, N

I_i ——颗粒 i 惯性矩, m^4

ω_i ——角速度, rad/s

T_r ——滚动摩擦转矩, $N \cdot m$

T_i, T_n ——切向力和法向力产生的扭矩, $N \cdot m$

为探讨不同转速下化肥颗粒在输肥管中的分布情况,对排肥器工作过程进行了仿真,使用 EDEM 2018 软件,所用颗粒类型为直径 3 mm 的球形颗粒,仿真模型如图 3 所示。为方便描述化肥颗粒分布情况,建立 XOY 坐标系,定义垂直排肥轮轴线方向为 X 向(行),平行排肥轮轴线方向为 Y 向(列);其中网格组用于统计通过输肥管各区域的颗粒数量,沿 X 向和 Y 向将网格组各平均分为 8 份。

仿真因素为槽轮转速,分别设置转速为 20、30、40、50 r/min,仿真时间为 13 s,其中前 3 s 用于生成颗粒,3 s 后槽轮启动,每组仿真重复 3 次求平均值,仿真参数设置参照文献[27]。仿真结束后依次获取通过每个网格单元的颗粒数量,分别沿 X、Y 轴对

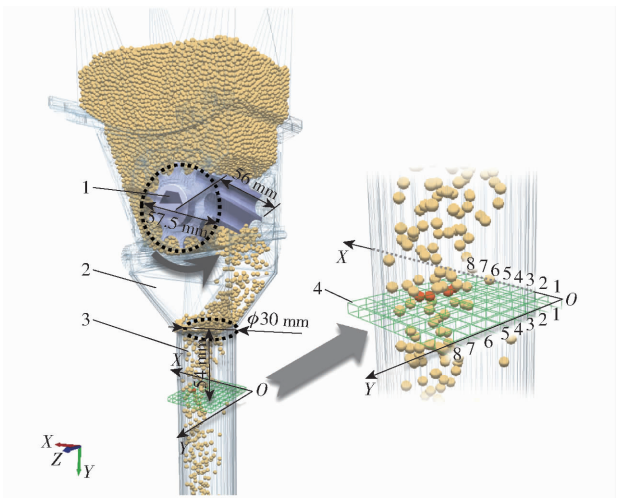


图 3 仿真模型建立

Fig. 3 Simulation model establishment

1. 排肥轮 2. 排肥器 3. 输肥管 4. 网格组

其进行累加,得到各行、列颗粒分布;设第 (i,j) 个单元格内颗粒数量为 n_{ij} ,则颗粒总数和各单元格内颗粒所占比例分别为

$$N = \sum_{k=1}^8 \sum_{l=1}^8 n_{kl} \quad (7)$$

$$\varphi_{kl} = \frac{n_{kl}}{N} \times 100\% \quad (8)$$

式中 N ——颗粒总数 k ——网格组行号
 l ——网格组列号
 n_{kl} ——第 k 行、 l 列对应单元格内的颗粒数量
 φ_{kl} —— n_{kl} 单元格内颗粒数量占颗粒总数的比例, %

图 4a 中,各行颗粒符合正态分布,颗粒集中分布于第 3~6 行,由于管道限制,第 1、2、7、8 行颗粒分布较少。与各列的颗粒分布比例相比,颗粒在各行的分布比例比较稳定,且不同转速下颗粒在各行的分布比例变化较小,因此红外光平行于 X 轴方向发射,颗粒经过检测区域时,能够对红外光形成稳定的遮挡面积。同时,颗粒在各行的分布比例存在差异,为了能准确反映不同区域的流量变化,红外 LED 应均匀的分布于检测截面。

图 4b 中,颗粒在第 1~5 列单元格分布较少,所占比例为 12.21%~13.22%;在第 6~8 列单元格中分布比例较高,比例为 86.78%~87.79%,主要原因是颗粒从排肥器外壳一侧滑落,引起颗粒向另一侧运动。颗粒在各列的分布差异显著,第 1 列分布比例为 0~0.05%,第 7 列分布比例最高,为 36.86%~39.81%;不同槽轮转速下,第 6、8 列颗粒分布比例变化较大。

2 台架试验

为验证颗粒流量传感器响应电压与化肥流量的

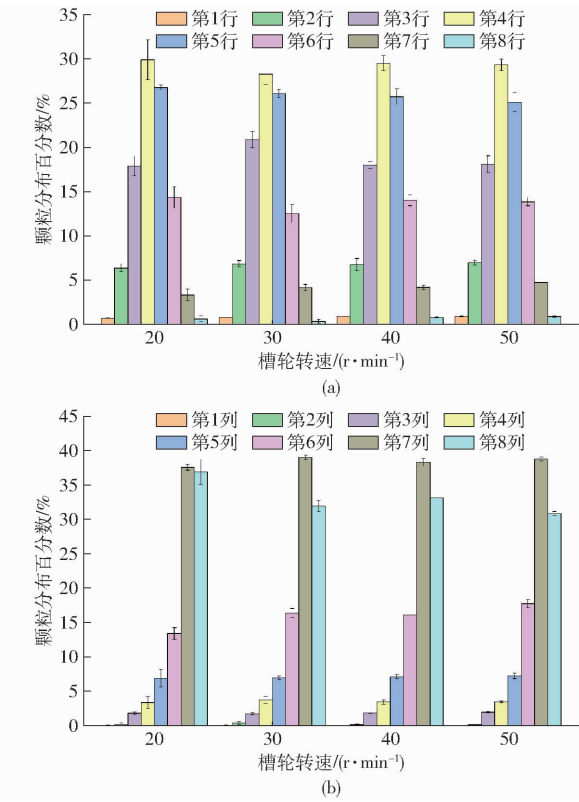


图 4 不同转速条件下颗粒分布百分数

Fig. 4 Particle distribution probability at different speeds

相关性,并分析排肥轮转速、检测模型、检测元件数量和输肥管直径对检测精度的影响规律,进行了台架试验。

2.1 试验台搭建

搭建试验台如图 5 所示,主要包括化肥箱、DC10600KM101AV 型触摸屏、57HSE2.2N 型步进电机、排肥器、输肥管、流量传感器、接料盒、HYPX-601 型称量计(量程 0~3 kg,精度 0.01 g)、控制总成等;其中排肥轮为螺旋槽式(直径 57.5 mm,长度 56 mm,螺距 500 mm,螺旋槽直径 15 mm,槽深 8 mm,槽数 10),显示屏主要用于排肥槽轮转速及启停的设置、颗粒流量传感器响应电压与称量计等数据显示。控制器板载 STM32c8t6 单片机与 ADS1256(精度:24 位)采样芯片,称量采样模块为电子秤专用模块 HX711(精度:24 位,telesky)。工作原理为:在步进电机驱动下,排肥槽轮转动使化肥排出,化肥沿输肥管进入颗粒流量传感器检测区域;化肥颗粒对红外光线产生遮挡使得接收端电压发生变化,控制器以频率 10 Hz 读取并记录响应电压;化肥通过检测区域后进入接料盒,称量计读取接料盒质量变化并发送至控制总成,控制总成将颗粒流量传感器与称量计数据发送至计算机,在计算机端完成数据处理。

2.2 试验材料

选择史丹利三安复合肥和河南金六顺农业有限公司生产的尿素作为试验材料,分别从两种化肥中

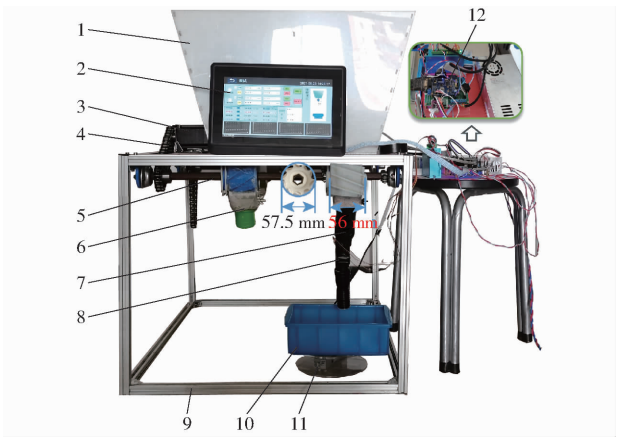


图 5 颗粒化肥流量检测试验台

Fig. 5 Granular fertilizer flow detection test bench

1. 化肥箱 2. 触摸屏 3. 步进电机 4. 传动链 5. 传动轴 6. 排肥器 7. 输肥管 8. 流量传感器 9. 台架 10. 接料盒 11. 称量计 12. 控制总成

分别选取 100 粒进行三轴尺寸测量,等效直径和球形率计算式为

$$D_p = (LWT)^{1/3} \tag{9}$$

$$S_p = \frac{(LWT)^{1/3}}{L} \times 100\% \tag{10}$$

式中 D_p ——化肥颗粒等效直径,mm
 S_p ——化肥颗粒球形度,%
 $L、W、T$ ——化肥颗粒长度、宽度和厚度,mm

使用测量工具及仪器包括 Sartorius 水分测定仪、Pfeuffer 数粒仪、英衡电子秤和量筒,具体参数如表 1 所示。

表 1 化肥参数
Tab. 1 Fertilizer parameters

项目		尿素	复合肥
三轴尺寸/mm	长	3. 83	2. 98
	宽	3. 62	2. 69
	厚	3. 45	2. 45
等效直径/mm		3. 63	2. 87
球形率/%		94. 78	90. 54
含水率/%		0. 38	1. 11
千粒质量/g		37. 40	17. 30
体积密度/(kg·m ⁻³)		984. 60	1 142. 80

2.3 试验设置

以上述试验台为基础,以尿素和复合肥为试验材料,排肥轮转速(即排肥流量)为试验因素,对颗粒流量传感器响应电压和排肥流量(称量计采集获得)的相关性进行了验证,并分析不同检测模型的检测精度及检测元件安装密度对检测精度的影响。尿素和复合肥使用量一般为 450 ~ 600 kg/hm² [28],据此设置 7 个排肥轮转速梯度,分别为 25、30、35、40、45、50、55 r/min,颗粒流量传感器和称量计采样

频率均为 10 Hz,采样时间为 30 s,系统运行流程如图 6 所示;实际施肥过程机具作业速度波动以及变量施肥会导致施肥流量不断变化,因此试验增设加速组,该组起始速度为 25 r/min,此后速度 1 r/s 增加,即角加速度为 6. 28 rad/s²;试验前在接料盒底部铺放一定厚度的颗粒物料,以减缓颗粒对称量计的冲击作用,每组试验重复 3 次。

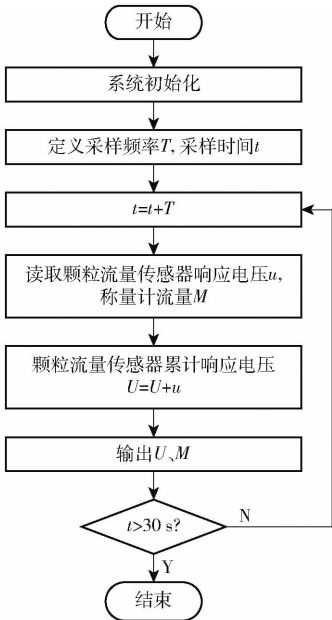


图 6 程序流程图

Fig. 6 Flowchart of the program

3 结果与分析

3.1 传感器响应电压与排肥流量相关性验证

通过试验分别获取了不同排肥轮转速下的颗粒流量传感器响应电压与排肥流量数据,根据散点图趋势对其进行线性拟合,如图 7、8 所示,对于尿素和复合肥,不同转速条件的拟合决定系数 R^2 均不小于 0. 992,表明传感器电压响应值和排肥流量具有较高的相关性。通过线性拟合得到排肥轮不同转速条件下方程为

$$y = Ax + B \tag{11}$$

式中 A ——方程斜率 B ——方程截距
 x ——传感器响应电压,V
 y ——化肥质量,g

不同转速条件下传感器响应电压和排肥流量拟合所得检测模型参数见表 2。图 9 为斜率、截距与排肥流量所绘散点图,尿素和复合肥的斜率与排肥流量相关性决定系数分别为 0. 840 9 和 0. 879 8,表明拟合方程斜率与排肥流量高度相关,方程斜率随排肥流量的增大而增大,原因是由于随着排肥槽轮转速增加,颗粒流在检测截面形成的遮挡面积增幅低于排肥流量的增加幅度,表明化肥颗粒在下落过

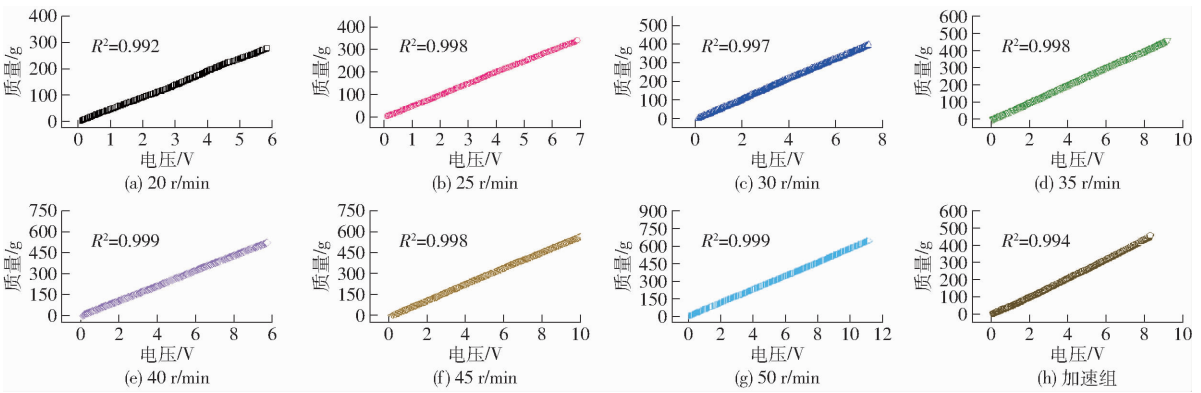


图 7 不同排肥转速下尿素的测试结果

Fig. 7 Test results of urea at different fertilizer discharge rates

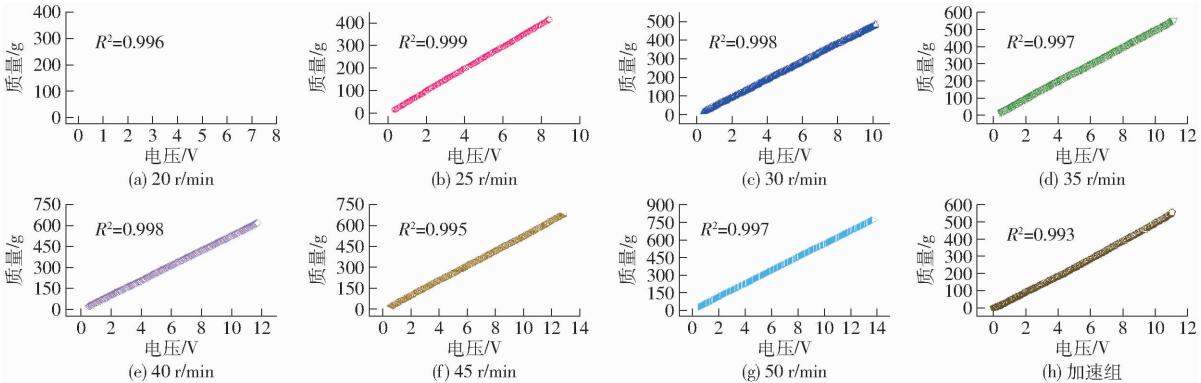


图 8 不同排肥转速下复合肥的测试结果

Fig. 8 Test results of compound fertilizer at different fertilizer discharge rates

表 2 检测模型参数

Tab.2 Parameters of detection models

化肥	参数	转速/($r \cdot \min^{-1}$)								整体
		20	25	30	35	40	45	50	加速组	
尿素	A	48.261	50.284	53.298	51.139	53.984	57.511	57.673	54.865	55.544
	B	-3.571	-3.943	-3.720	-1.054	-1.871	-4.258	-5.442	-11.247	-11.669
复合肥	A	49.307	51.823	51.658	52.798	53.062	53.430	55.981	52.166	53.096
	B	-4.876	-0.390	-0.166	-1.329	-4.470	-0.947	-1.443	-10.367	-12.150

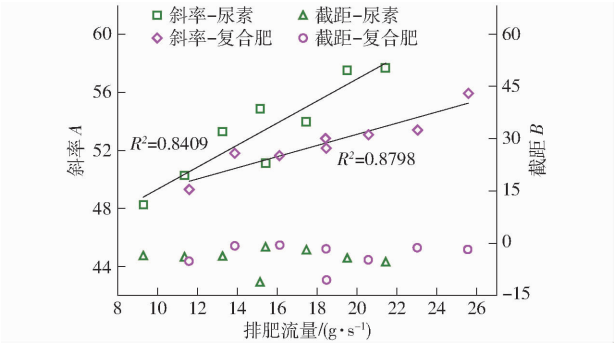


图 9 斜率、截距与排肥流量的关系曲线

Fig. 9 Seeding amount detection circuit

程中其松散系数随流量增大而降低,即颗粒流量越大,颗粒流内颗粒分布越紧凑,与文献[29]研究结论一致。

随着排肥流量增加,尿素拟合方程斜率由 48.261 增至 57.673,复合肥则由 49.307 增至

55.981,尿素拟合方程斜率变化幅度较大,可能是由于尿素等效直径较大且体积密度小,造成其颗粒流下落过程松散程度较高,当排肥流量变化时,尿素颗粒松散程度变化比复合肥高。此外,根据理论分析,排肥流量为 0 时,颗粒流量传感器响应电压应为 0,因此拟合模型截距应为 0,由表 2 和图 9 可知,加速组及整体拟合所得截距较大,其余组截距较为随机,造成截距不为 0 的主要原因是检测系统存在随机误差,如系统电压不稳定,称量计和颗粒流量传感器采样噪声等。

表 3 为各转速条件下颗粒流量传感器累计响应电压与排肥量,为明确其关系对其进行线性拟合,如图 10 所示。各排肥轮转速条件下,尿素和复合肥的决定系数 R^2 分别为 0.975 和 0.976,表明化肥排量和流量传感器累计电压有较强的相关性,因此可以

采用某个转速条件下的拟合模型实现对其他转速条件下的施肥流量检测。

表 3 各试验累计响应电压与排肥量

Tab.3 Cumulative response voltage and fertilizer discharge of each test

转速/ (r·min ⁻¹)	尿素		复合肥	
	响应电压/V	化肥质量/g	响应电压/V	化肥质量/g
25	5.832	278.760	7.064	347.854
30	6.889	341.069	8.390	416.582
35	7.383	397.745	10.172	484.210
40	9.196	462.737	11.110	553.578
45	9.710	523.867	11.714	617.312
50	10.242	585.392	12.879	690.884
55	11.139	643.248	13.742	766.974
加速组	8.283	454.520	11.032	554.260

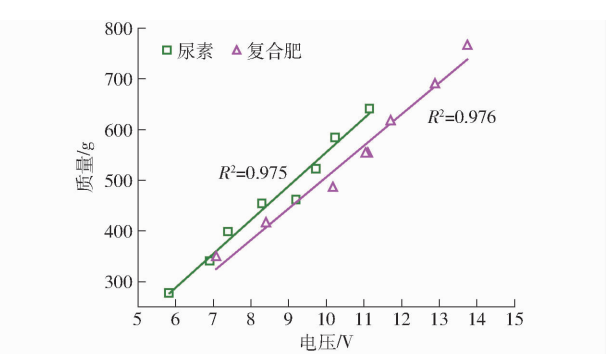


图 10 传感器响应累计电压与化肥排量关系曲线
Fig.10 Relationship between cumulative voltage of sensor response and fertilizer displacement

3.2 不同检测模型检测精度对比

为确定最优检测模型,对表 2 所示不同转速检测模型进行了测试,结果如图 11 所示,排肥轮转速为 20~30 r/min 时,模型 1~3 均有较低检测误差,随着转速提高检测误差增大;排肥轮转速为 40~50 r/min 时,模型 6~7 检测误差较低,并随着排肥轮转速降低而增大;排肥轮转速为 30~40 r/min 时,模型 4~5 检测误差较低;模型 8 和 9 检测误差比较接近,主要是因为两者斜率和截距都较为相近(表 2);模型 8、9 检测误差较低,对于尿素,模型 8 和 9 的平均绝对百分比误差分别为 5.18% 和 5.16%,复合肥则分别为 4.07% 和 4.45%;上述结果表明检测模型建立时排肥流量范围和检测对象的排肥流量越接近,越能获得较低检测误差;加速组排肥轮变速运动提高了模型 8 对排肥流量的适应范围,由整体数据建立的检测模型 9 综合了 8 组试验的采样数据,因此模型 8 和 9 检测误差较低,而模型 9 所需数据量较大,模型 8 则仅通过 1 组数据建立,因此加速组为较优检测模型。

3.3 检测元件密度对传感器性能的影响

为提高颗粒流量传感器的适用范围,应明确敏

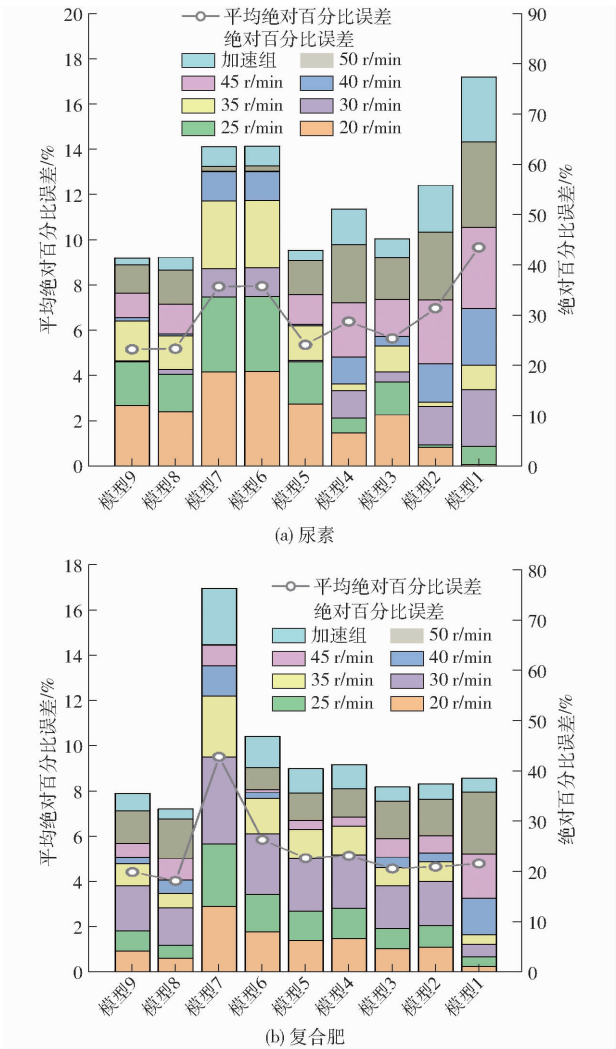


图 11 各检测模型检测误差
Fig.11 Detection error of each detection model

感元件安装数量对传感器性能的影响规律,为匹配不同管径输肥管提供传感器的设计依据。选取管径为 25、30、40 mm 的输肥管,同时设计了相应尺寸的颗粒流量传感器,根据传感器尺寸确定了检测元件最大安装数量和数量梯度。如图 12 所示,颗粒流量传感器安装了不同组数的检测元件,以研究检测元件安装密度对检测精度的影响。为方便分析,检测元件安装密度为

$$\delta = \frac{nD_{LED}}{D_s}$$

(12)

- 式中
- δ ——检测元件安装密度

n ——检测元件安装组数

D_{LED} ——检测元件直径,取 3 mm

D_s ——流量传感器内径,mm

为分析检测元件密度对检测精度的影响,首先通过加速组试验分别建立 9 种颗粒流量传感器的检测模型,以排肥轮转速为试验因素,进行上述 8 种排肥轮转速的排肥流量检测试验,计算得到各流量传感器的平均绝对百分比误差,如表 4 和图 13 所示。

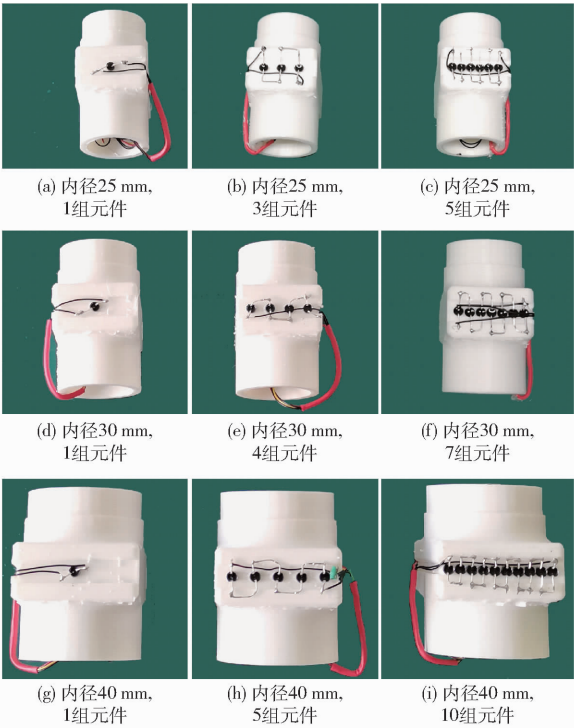


图 12 不同直径的颗粒流量传感器示意图

Fig. 12 Particle flow sensors with different diameters

表 4 检测元件密度对检测精度的影响
Tab. 4 Influence of detection element density on detection accuracy

输肥管直径/ mm	元件数量	δ	平均绝对百分比误差/%	
			尿素	复合肥
25	1	0.12	8.71	8.31
	3	0.36	5.23	5.76
	5	0.72	5.37	4.84
30	1	0.10	8.06	9.11
	4	0.40	5.35	6.74
	7	0.70	5.18	4.07
40	1	0.075	9.33	8.84
	5	0.375	6.56	5.42
	10	0.750	4.75	4.51

由表 4 可知,当检测元件密度为 0.075 ~ 0.75 时,对于尿素和复合肥各流量传感器的平均绝对误差分别为 4.75% ~ 9.33% 和 4.07% ~ 9.11%,与 1.3 节所得结论一致,由于化肥颗粒在检测截面有相对稳定的分布规律,故可通过检测截面某区域的

颗粒分布量推测整个截面的颗粒分布量。采用对数函数对两者进行拟合,得到尿素和复合肥的相关性决定系数分别为 0.934 和 0.903,表明化肥颗粒在检测截面虽具有相对稳定的分布规律,但在实际检测环境中其分布规律会产生微弱变化,增加检测元件密度进而提高光线在检测截面的分布均匀性,能够更加准确地感知这种微弱变化,有利于提高检测精度。

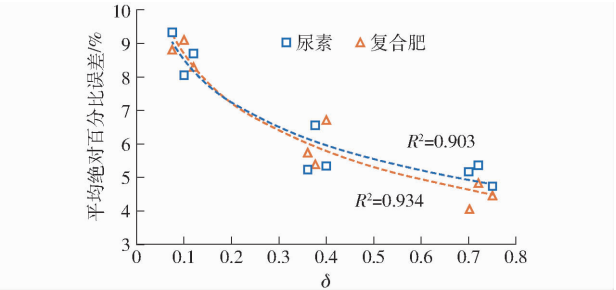


图 13 检测元件密度与平均绝对误差的关系曲线

Fig. 13 Detection element density and MAPE

4 结论

(1)在理论分析的基础上设计了颗粒流量传感器,并搭建了颗粒流量检测试验台;以尿素和复合肥为试验材料,以排肥轮转速为试验因素对上述理论进行了验证,结果表明化肥流量与传感器响应电压存在较强的线性相关,排肥轮转速固定时,两者相关性决定系数均高于 0.992。

(2)以排肥轮转速为试验因素,建立了不同转速条件下的检测模型,为确定最优检测模型,以平均绝对百分比误差为指标对不同检测模型进行了对比,基于加速组建立的检测模型对尿素和复合肥的平均绝对百分比误差分别为 5.18% 和 4.07%,由此确定最优检测模型建立方法。

(3)以敏感元件数量和颗粒流量传感器内径为试验变量进行试验,结果表明当检测元件密度为 0.075 ~ 0.75 时,对于尿素和复合肥各流量传感器的平均绝对百分比误差分别为 4.75% ~ 9.33% 和 4.07% ~ 9.11%,颗粒流量传感器平均绝对百分比误差随检测元件密度增大而降低。

参 考 文 献

[1] 陈静,吴永常,陈立平. 基于部分预算法的玉米大田变量施肥经济效益分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 141 – 146.
CHEN Jing,WU Yongchang, CHEN Liping. Economic benefit analysis of variable-rate fertilization technology in maize (*Zea mays*) field based on partial budget analysis method[J]. Transactions of the CSAE,2017, 33(19):141 – 146. (in Chinese)
[2] ZHANG Jiqin, LIU Gang, LUO Chengming, et al. MOEA/D – DE based bivariate control sequence optimization of a variable-rate fertilizer applicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,167:105063.
[3] CUI Zhenling, ZHANG Hongyan, CHEN Xinping, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers [J]. Nature, 2018, 555:363 – 366.
[4] NADERLOO L, ALIMARDANI R, OMID M, et al. Application of ANFIS to predict crop yield based on different energy inputs [J]. Measurement, 2012,45(6):1406 – 1413.
[5] 王大可,衣淑娟,赵雪,等. 气吸精播机施肥量无线计量监测系统研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 84 – 88.

- WANG Dake, YI Shujuan, ZHAO Xue, et al. Research on precise seeder wireless measurement monitoring system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 84–88. (in Chinese)
- [6] YU Hongfeng, DING Yongqian, FU Xiuqing. A solid fertilizer and seed application rate measuring system for a seed-fertilizer drill machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 836–844.
- [7] ZHAO Jiale, WANG Xiaogeng, TIAN Hongli. 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.
- [8] ZHENG Yingna, LIU Qiang. Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids[J]. Measurement, 2011, 44: 589–604.
- [9] BACK S W, YU S H, KIM Y J. An image-based application rate measurement system for a granular fertilizer applicator[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2014, 57(2): 679–687.
- [10] ZOU Jing, LIU Chengguo, WANG Haigang, et al. Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave Doppler methods[J]. Powder Technology, 2020, 360: 112–119.
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 余洪锋, 丁永前, 谭星祥, 等. 施肥机施肥性能检测装置的设计与试验[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(3): 511–517. YU Hongfeng, DING Yongqian, TAN Xingxiang, et al. Design and experiments on equipment for detecting performance of fertilizer applicator[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(3): 511–517. (in Chinese)
- [14] TARUNA B, PUTRA W. New low-cost portable sensing system integrated with on-the-go fertilizer application system for plantation crops[J]. Measurement, 2020, 155: 107562.
- [15] 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)
- [16] CARPENTER W O, GOODWILLER B T, CHAMBERS J P. Acoustic measurement of suspensions of clay and silt particles using single frequency attenuation and backscatter[J]. Applied Acoustics, 2014, 85: 123–129.
- [17] KARIMI H, NAVID H, MAHMOUDI A. Online laboratory evaluation of seeding-machine application by an acoustic technique[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2015, 13(1): 202.
- [18] 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)
- [19] 金鑫, 李倩文, 苑严伟, 等. 2BFJ-24 型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 84–92. JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat precision seed sowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 84–92. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] LIU Wei, HU Jianping, ZHAO Xingsheng. Development and experimental analysis of an intelligent sensor for monitoring seed flow rate based on a seed flow reconstruction technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 4: 104899.
- [22] 姜萌, 刘彩玲, 鑫都. 小麦精少量播种播量检测系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 50–58. JIANG Meng, LIU Cailing, DU Xin, et al. Development of seeding rate detection system for precision and small amount sowing of wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 50–58. (in Chinese)
- [23] 王在满, 裴娟, 何杰, 等. 水稻精量穴直播机播量监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 9–16. WANG Zaiman, PEI Juan, HE Jie, et al. Development of the sowing rate monitoring system for precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 9–16. (in Chinese)
- [24] 宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三色 LED 的调光调色方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 293–300. SONG Pengcheng, WEN Shangsheng, SHANG Jun, et al. A dimming method for RGB LED based on three channels' PWM[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 293–300. (in Chinese)
- [25] 杨庆璐, 王庆杰, 李洪文, 等. 气力集排式排肥系统结构优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 1–10. YANG Qinglu, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Structural optimization and experiment of pneumatic centralized fertilizer system[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13): 1–10. (in Chinese)
- [26] VAN L P, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader[J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348–360.
- [27] LIU Jinsong, GAO Changqing, NIE Yuanji, et al. Numerical simulation of fertilizer shunt-Plate with uniformity based on EDEM software[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105737.
- [28] 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)
- [29] 何娜. 撒落型散粒体斜坡变形破坏机制试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013. HE Na. Deformation failure mechanism test studying on the scattered sand-sliding slope[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese)