

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.016

双变量螺旋外槽轮排肥器控制序列对排肥性能的影响

张季琴^{1,2} 刘刚^{1,3} 胡号^{1,3} 黄家运^{1,3} 刘元杰^{1,3}

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 宁夏大学机械工程学院, 银川 750021;

3. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 施肥稳定性是评价变量施肥机作业性能的重要指标,为了研究排肥口开度(L)和排肥轴转速(n)的组合对排肥性能的影响规律,本文基于离散单元方法,对同一目标施肥量下,不同 L 和 n 组合下的施肥过程进行仿真。首先,通过标定试验,构建了基于广义回归神经网络 GRNN 的排肥量预测模型,经过验证,其决定系数达到 0.999 4,预测平均相对误差(MRE)为 3.56%。其次根据螺旋外槽轮排肥装置的等排肥量曲线,选择 3 个排肥量 1 067.37、2 323.04、4 206.56 g/min 为目标排肥量,并利用差分进化算法(DE)确定同一目标施肥量下的控制序列(L, n)的组合。最后,利用离散元仿真软件 EDEM 2.8 分别对 3 个目标施肥量,不同控制序列下的排肥过程进行仿真。采用排肥均匀性变异系数 σ 作为评价排肥稳定性的指标,仿真结果表明,在目标排肥量 Q_1 下,当控制序列为(25 mm, 17.78 r/min)时, σ 最小,为 5.27%;在其他控制序列, σ 均高于 20%,排肥稳定性较差,且出现断条现象。在目标排肥量 Q_2 下,当控制序列为(65 mm, 17.12 r/min)时, σ 最小,为 3.46%。在目标排肥量 Q_3 下, σ 均小于 4%,且在控制序列(65 mm, 32.85 r/min), σ 达到最小,为 2.08%。当目标施肥量较小时,控制序列的选择对排肥稳定性影响显著,工作时,应尽量避免开度、转速的边界量。当目标施肥量较大时,控制序列选择对外槽轮排肥稳定性的影响较小。结果表明,螺旋外槽轮排肥器具有较好的排肥稳定性。

关键词: 螺旋外槽轮排肥器; 双变量; 控制序列; 广义回归神经网络; 离散元法

中图分类号: S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0137-08

Influence of Control Sequence of Spiral Fluted Roller Fertilizer Distributer on Fertilization Performance

ZHANG Jiqin^{1,2} LIU Gang^{1,3} HU Hao^{1,3} HUANG Jiayun^{1,3} LIU Yuanjie^{1,3}

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Application uniformity is an essential aspect of the performance of a variable-rate fertilization (VRF) applicator. In order to study the relationship between fertilization uniformity and control sequence such as active feed-roll length (L) and rotational speed of the drive shaft (n) for a spiral fluted-roll fertilizer distributer for a bivariate fertilization applicator, the discrete element simulation model was established and the fertilization uniformity was studied by conducting discrete element simulation tests via the discrete element method (DEM) software. Firstly, a calibration was conducted at different active-feed roll length (L) and rotational speed of the drive shaft (n), and then the fertilization model was formed by general regression neural network (GRNN). To test model prediction accuracy, another 20 samples were utilized as test set, the validation result showed that the correlation coefficient (R^2) was up to 0.999 4 and the mean relative error (MRE) was 3.56%. In addition, three target fertilization, including $Q_1 = 1\ 067.37$ g/min, $Q_2 = 2\ 323.04$ g/min, $Q_3 = 4\ 206.56$ g/min, were chosen according to the

收稿日期: 2020-08-18 修回日期: 2020-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700503)

作者简介: 张季琴(1985—),女,博士生,宁夏大学讲师,主要从事精细农业关键技术研究, E-mail: zhjq2010jasmine@163.com

通信作者: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究, E-mail: pac@cau.edu.cn

equal discharge curve of spiral fluted-roll fertilizer distributor and control index (L, n) at the same target fertilization rate were found by differential evolution algorithm (DE) and formed GRNN model. Finally, the fertilization simulation tests at different control indexes for three different target rates were conducted via EDEM 2.8 software. The coefficient of variation σ was calculated as criteria to evaluate the fertilization uniformity. The result showed that, at target rate of Q_1 , the minimized σ occurred at the control index of (25 mm, 17.78 r/min), which was 5.27%. At target rate of Q_2 , the minimized σ was occurred at control index of (65 mm, 17.12 r/min), which was 3.46%. At target rate of Q_3 , σ was below 4% at all control index. The minimized σ occurred at control index of (65 mm, 32.85 r/min), which was 2.08%. In conclusion, at the small target fertilization rate, the selection of the control sequence had a significant impact on fertilization performance. In fertilization, the opening length and rotational speed boundaries should be avoided. At the large target fertilization rate, the selection of the control sequence had little effect on the fertilization uniformity of spiral fluted-roll fertilizer distributor.

Key words: spiral fluted roller fertilizer distributor; bivariate; control sequence; GRNN; discrete element method

0 引言

变量施肥技术能够根据土壤营养状况按需投入肥料,有效降低肥料使用,提高作物产量,提升肥料利用率同时减少环境污染,是精细农业实践的重要组成部分,也是现代农业发展的重要方向之一^[1-3]。现有的变量施肥机的排肥方式主要包括外离心式、螺旋式和外槽轮式等^[4]。基于外槽轮式排肥器的变量施肥机主要通过改变排肥轴转速来调节施肥量^[5-7]。这种单一变量控制方式存在施肥量调节范围小,低速排肥时脉动性明显,排肥均匀性差等缺点,从而影响了变量施肥机的作业性能^[8]。为了克服这些缺点,刘成良等^[9]设计了一种排肥口开度(L)、排肥轴转速(n)双变量可调的施肥控制系统,扩展了施肥量调节范围,提高了变量施肥控制准确性和稳定性。近年来,国内外学者在双变量施肥机设计和控制方面也做了大量研究^[10]。ALAMEEN等^[11]基于一个手动调节开度的播种施肥机,搭建了一个可以通过气缸实时自动调节开度的双变量施肥试验台。SU等^[12]通过对库恩气吸式点播机的改造,实现了对外槽轮有效工作长度的自动控制,试验结果表明,不同排肥开度下的排肥稳定性变异系数达到8.4%。戚武振等^[13-14]设计了一种基于CAN总线的稻麦变量施肥机,利用步进电机实时调节外槽轮排肥器的开度,实现了施肥量的调节,使得各行排肥器之间的排肥量变异系数小于1.78%,变量施肥精度能够达到97%。

施肥准确性和稳定性是评价变量施肥机作业性能的重要指标,对于开度和转速均可调的双变量排肥装置,同一目标施肥量,可以由多种不同的开度、转速组合控制实现,但非优的开度和转速组合,会降低排肥稳定性和精度^[8],因此,寻找最优控制序列是提高作业精度的关键。YUAN等^[15]对控制序列

优化方法进行了系统研究,提出了基于高斯过程(Gauss process, GP)的双变量排肥预测模型,并利用加权和法获得了优化控制序列列表,为双变量控制序列优化方法的研究奠定了基础。陈满等^[16]采用Bisquare估计稳健值回归方法,构建了双变量控制模型,并分析了转速优先控制、开度优先控制以及双变量自适应控制3种控制策略,构建了变量施肥控制序列查询表,为实现双变量自适应控制提供依据。赵学观等^[17]研究了影响双变量排肥装置充肥性能的因素,并利用排肥轴转速、开度和排肥量之间的关系模型,提出了分段控制方法,取得了较好的控制精度。

本文研究螺旋外槽轮排肥器的控制序列开度、转速组合对排肥性能的影响。通过标定试验建立基于广义径向基神经网络(General regression neural network, GRNN)的排肥量预测模型;基于差分进化算法(Differential evolution algorithm, DE)和排肥量预测模型,设计同一目标施肥量、不同控制序列下的离散元仿真排肥试验,以期为实现双变量施肥系统的优化控制提供参考。

1 双变量施肥装置工作原理

双变量调节机构的工作原理图如图1所示。双变量调节装置主要由转速调节装置和开度调节装置组成。转速调节装置包括伺服电机、减速器、联轴器以及螺旋外槽轮排肥器。其中伺服电机驱动轴通过减速器与外槽轮驱动轴相连,伺服电机转动时带动外槽轮转动,实现对排肥轴转速 n 的调节。通过调整外槽轮排肥器顶部的排肥口挡板的开口实现外排肥轴开度 L 的调节,如图1所示,开度调节装置包括开度调节挡板、电子推杆、电子尺。开度调节挡板与电子推杆通过螺栓相连,电子推杆运动时,带动开度调节挡板以及与之相连的电子位移传感器同步运

动,电子位移传感器实时反馈当前位置信息,实现开度的闭环控制。

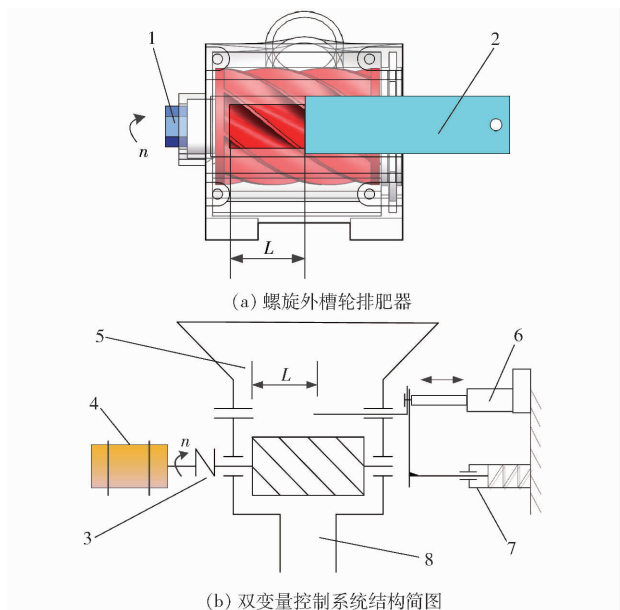


图 1 双变量调节装置工作原理图

Fig. 1 Schematic of bivariate control mechanism

1. 排肥轴 2. 肥口开度调节挡板 3. 联轴器 4. 伺服电机 5. 肥箱 6. 电子推杆 7. 电子尺 8. 肥管

双变量调节装置实物如图 2 所示。

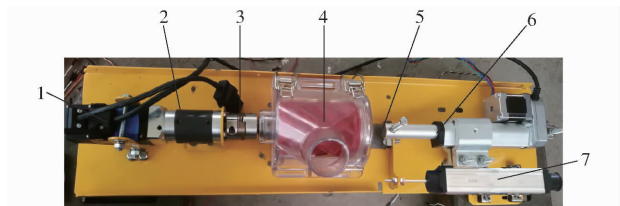


图 2 双变量调节机构实物图(调节单体)

Fig. 2 Real image of bivariate fertilization device

1. 伺服电机 2. 减速器 3. 联轴器 4. 螺旋外槽轮排肥器 5. 开度调节挡板 6. 电子推杆 7. 电子尺

2 排肥量预测模型构建

2.1 标定试验

为了构建螺旋外槽轮排肥器的排肥量预测模型,对不同开度、转速条件下的排肥量进行了标定^[16-17]。标定试验在基于大华集团的 4 行玉米播种施肥机改装的双变量施肥机上进行。采用撒可富品牌的复合肥进行施肥,其氮磷钾质量比为 11:4:5,密度为 1 555 kg/m³。为了满足肥料下落的最低开度要求和伺服电机的最低工作转速要求,设置排肥口开度调节范围为 15 ~ 70 mm,排肥轴转速调节范围为 10 ~ 60 r/min,调节步长为 5,共 132 组。每种参数条件下测量 1 min 的排肥量,并称量记录。每种条件下至少重复 3 次,并取均值。

利用 Matlab 对标定试验的数据进行曲面拟合,

获得不同排肥口开度 L 和排肥轴转速 n 下的排肥量曲面如图 3a 所示。由图 3a 可知,随着开度和转速的提高,排肥量呈上升趋势。由图 3b 可知,同一目标排肥量,对应着无数组开度和转速组合。

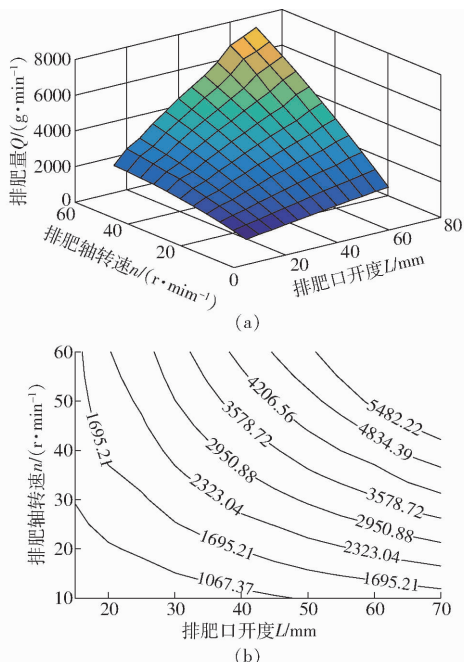


图 3 排肥量和开度、转速的拟合响应关系

Fig. 3 Relationship diagram based on fitting equation

2.2 排肥量预测模型构建

广义径向基神经网络 (GRNN) 是建立在数理统计基础上的径向基函数网络。GRNN 具有较强的非线性映射能力和学习速度,与 BP 网络相比,单程训练不需要迭代,计算量小,样本数据较少时,仍然能够保持良好的预测性能^[18]。

GRNN 通过计算输出变量 Y 与输入变量 X 的非线性回归,获得概率最大的 y 。当给定一个随机变量 x 的测量值 X ,随机变量 Y 的条件平均为^[18]

$$\hat{Y} = E\left(\frac{y}{X}\right) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} yf(x, y) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy} \quad (1)$$

式中 X —— n 维的输入向量

\hat{Y} ——GRNN 模型的预测值

$E(y/X)$ ——输出 Y 的期望值

$f(x, y)$ ——基函数,采用高斯函数

将 $f(x, y)$ 表达式代入式 (1) 可得网络输出值 \hat{Y} 为

$$\hat{Y}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \exp\left(-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\delta^2}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(X - X_i)^T (X - X_i)}{2\delta^2}\right)} \quad (2)$$

式中 δ ——平滑因子

Y_i ——训练样本因变量

可见,预测值 \hat{Y} 是所有训练样本因变量 Y_i 的加

权平均,其权重因子为对应自变量 x_i 与均值 x 的欧氏距离平方的指数。

基于 GRNN 的螺旋外槽轮排肥器排肥量预测模型结构如图 4 所示。将排肥口开度 L 和排肥轴转速 n

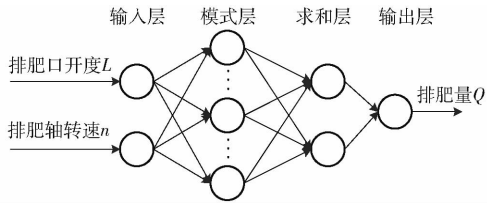


图 4 基于 GRNN 的排肥量预测模型结构图

Fig.4 Structure diagram for GRNN of discharge fertilizer rate

表 1 测试集

Tab.1 Test sample

序号	开度 L/mm	转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	排肥量 $Q/(\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$	序号	开度 L/mm	转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	排肥量 $Q/(\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$
1	18	16	782.37	11	38	26	2018.53
2	18	35	1454.10	12	40	18	1518.80
3	18	56	1961.67	13	40	22	1814.13
4	22	26	1328.10	14	53	17	1823.30
5	22	41	1888.80	15	53	36	3543.23
6	22	53	2256.60	16	53	40	3884.43
7	33	28	1966.87	17	63	15	1888.33
8	33	38	2538.63	18	63	27	3241.10
9	38	18	1485.83	19	63	46	5105.20
10	38	25	1981.96	20	63	33	3873.46

2.3 排肥量预测模型精度分析

螺旋外槽轮排肥器排肥量预测模型测试结果如图 5 所示。由图 5a 可知,模型预测值与试验值决定系数达到 0.999 4,平均相对误差为 3.56%。由

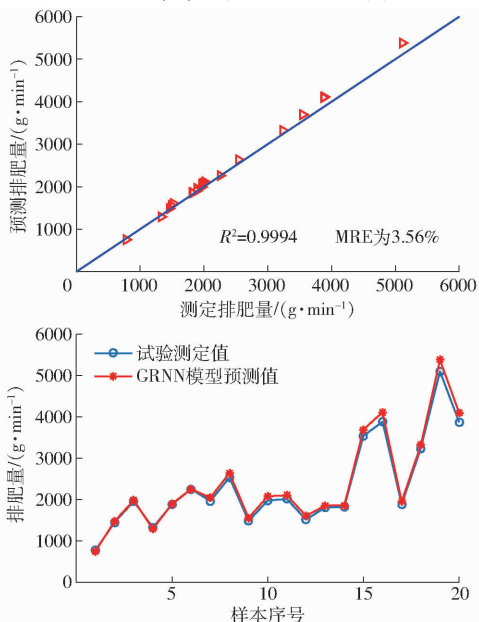


图 5 基于 GRNN 排肥预测模型预测性能

Fig.5 Prediction performance of fertilization rate model based on GRNN

速 n 作为模型输入,排肥量 Q 为模型输出。GRNN 模型结构主要包括输入层、模式层、求和层和输出层。

将标定获得的 132 组样本数据,代入 Matlab 软件进行训练,最终获得不同开度和转速组合下的排肥量的预测模型。

$$g(L, n) = Q \quad (3)$$

为了验证排肥量预测模型的精度,选取未参加训练的 20 个样本(表 1)作为测试集,对模型进行测试。计算模型预测值和试验值之间平均相对误差 (MRE) 与模型决定系数,对模型的精度进行评价。

图 5b 可知,模型预测值能够很好地拟合试验值。因此,GRNN 能够应用于不同控制序列下螺旋外槽轮排肥器的排肥量预测。

3 离散元仿真试验

离散元法 (Discrete element method, DEM) 能够通过建立颗粒系统的离散元参数化模型,进行颗粒运动行为的模拟,在外槽轮排肥器的结构参数优化方面应用广泛^[20-23]。根据 EDEM 软件仿真的一般计算方法,需要建立肥料颗粒的离散元模型以及螺旋外槽轮排肥器的三维实体模型,确定其接触参数。

3.1 肥料颗粒离散元模型

构建肥料颗粒的离散元模型,首先需要获取肥料的物理、力学特征参数。对肥料颗粒密度、肥料颗粒三维尺寸(长度、宽度、厚度)等进行测量,作为离散元仿真肥料颗粒建模的依据。随机选取复合肥 100 粒,利用精度为 0.01 mm 的游标卡尺分别测量选取肥料长度、宽度、厚度,获取肥料颗粒等效直径计算公式为^[24]

$$D = \sqrt[3]{lWt} \quad (4)$$

式中 l ——肥料颗粒长度,mm

W ——肥料颗粒宽度,mm

T ——肥料颗粒厚度, mm

肥料颗粒球形率 φ 计算公式为

$$\varphi = \frac{D}{l} \times 100\% \quad (5)$$

经过测量获得的复合肥的三维尺寸的平均值为长度 3.71 mm, 宽度 3.08 mm, 厚度 2.65 mm, 平均等效直径 3.11 mm, 平均球形率 84.36%。等效直径分布和球形率分布图如图 6 所示, 由图可知, 复合肥颗粒的等效直径主要集中在 2.9 ~ 3.8 mm 之间, 占肥料颗粒 82%, 球形率不高, 因此采用组合颗粒模型来模拟实际肥料颗粒模型。

为了使得颗粒肥的三维模型更加贴近肥料的实际尺寸, 在仿真试验中, 采用 3 种组合颗粒模型, 分别模拟小、中、大 3 种尺寸的肥料颗粒, 其占比依次为 10%、82%、8%, 如图 7 所示。

3.2 排肥器离散元模型建立与物料特性参数选择

利用三维建模软件 SolidWorks, 构建双变量螺旋外槽轮排肥装置的三维实体模型, 根据必要的约

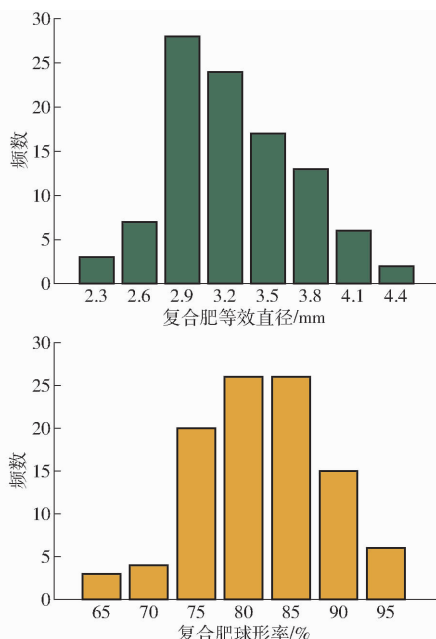


图 6 复合肥颗粒的等效直径和球形率分布

Fig. 6 Three-dimensional dimensions of compound fertilizer

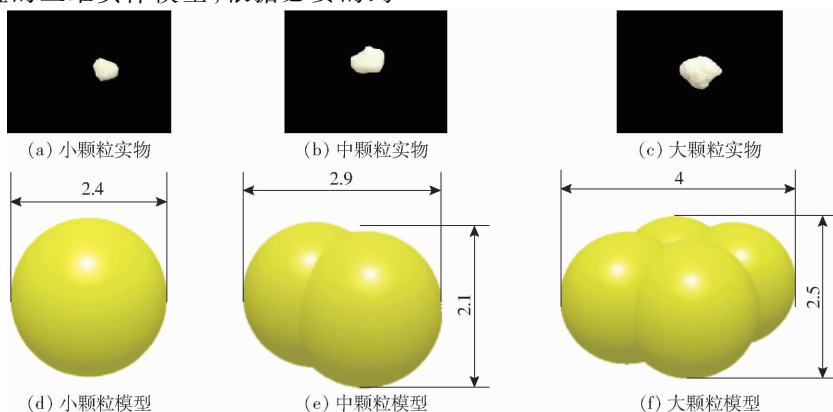


图 7 颗粒肥离散元模型

Fig. 7 Model of fertilizer particle

束和驱动进行装配, 另存为 .igs 格式, 导入 EDEM 2.8 软件的求解环境中, 装配组件如图 8 所示。其中, 在 SolidWorks 中装配时调整排肥口开度的大小, 在 EDEM 软件中设置转速。

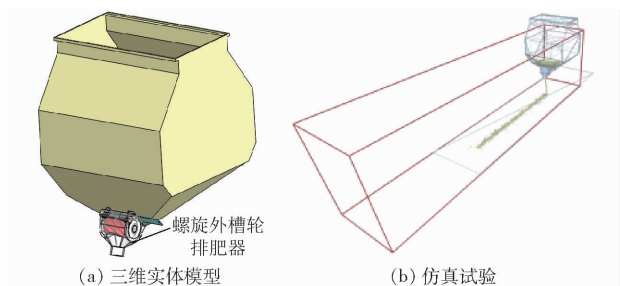


图 8 双变量施肥装置三维装配及仿真

Fig. 8 Assembly and simulation drawing of bivariate device

由于肥料排出过程中不涉及颗粒之间的粘结作用, 因此接触模型采用 EDEM 软件内置的 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型^[21]。肥料颗粒、肥箱、排肥

器和地面等相关材料和接触力学参数^[25]如表 2 所示。

表 2 离散元模型材料及接触力学参数

Tab. 2 Materials properties and contact mechanical parameters of discrete element models

参数	肥料颗粒	排肥器	肥箱	地面
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 555	1 200	7 830	2 500
泊松比	0.25	0.41	0.35	0.30
剪切模量/MPa	1	113	72 700	1
接触力学参数	弹性恢复系数	颗粒-颗粒		0.378
		颗粒-排肥器		0.410
		颗粒-肥箱		0.356
		颗粒-地面		0.020
		颗粒-颗粒		0.370
	静摩擦因数	颗粒-排肥器		0.193
		颗粒-肥箱		0.314
		颗粒-地面		1.250
		颗粒-颗粒		0.300
		颗粒-排肥器		0.095
动摩擦因数	颗粒-肥箱		0.306	
	颗粒-地面		1.240	

3.3 仿真试验

为了研究同一目标排肥量下开度、转速组合对变量施肥性能的影响,根据标定试验以及构建的基于 GRNN 的排肥量预测模型,选取 3 个施肥量 1 067.37、2 323.04、4 206.56 g/min 为目标排肥量,并分别对每个目标施肥量下,不同开度、转速组合下的排肥过程进行仿真。

为了模拟实际排肥过程,观察肥料颗粒在水平地表的分布情况,在距离排肥盒下端 300 mm 的位置,设置一块长 2 500 mm,宽 600 mm 的平面,用来模拟地面。为了提高仿真效率,首先进行颗粒的生成,设置颗粒工厂每秒钟产生 2×10^4 个颗粒,共生成总量 2×10^5 个颗粒;然后启动排肥器转动和地面移动 ($v = -0.5$ m/s),进行排肥过程的仿真,仿真试验如图 8b 所示。

3.3.1 试验设计

根据螺旋外槽轮排肥器的等排肥量曲线(图 3b),选择施肥量 1 067.37、2 323.04、4 206.56 g/min 目标排肥量,如图 9 所示。为了获得同一目标施肥量的控制参数即不同 L 和 n 的组合,本文利用差分进化算法(DE)以及构建的基于 GRNN 排肥量预测模型,求解开度 L 分别为 15 ~ 70 mm(增量为 10 mm)时,不同目标施肥量下对应的转速。

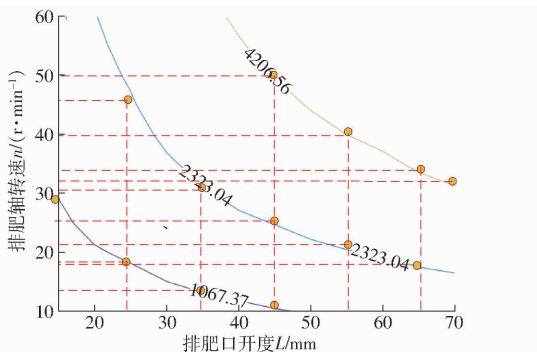


图9 目标施肥量和控制序列选择

Fig. 9 Schematic of target rate and control sequence choice

DE 是一种高效的全局优化算法^[26],也是一种基于群体的启发式搜索算法,种群中每个个体对应一个解向量。差分算法的进化流程与遗传算法(Genetic algorithm, GA)类似,包含变异、交叉、选择操作。为了获取同一目标施肥量下,一定开度 L 下的转速 n ,选择目标施肥量和开度作为模型输入,代入训练好的 GRNN 排肥量预测模型,寻找最优转速度,定义适应度函数为

$$fitness(n) = \frac{|Q_{pre} - Q_{tar}|}{Q_{tar}} \quad (6)$$

式中 Q_{pre} ——训练好的 GRNN 模型预测排肥量
 Q_{tar} ——输入的目标排肥量值

经过 20 代迭代之后,获得使得适应度函数最小的转速 n 。3 个不同目标施肥量下控制序列的求解结果如表 3 所示,仿真试验的控制参数(排肥口开度 L ,排肥轴转速 n)按照表 3 进行设置。

表 3 同目标排肥量下的不同控制序列组合

Tab. 3 Control sequences at the same target rate

控制序列	目标排肥量/(g·min ⁻¹)		
	1 067.37	2 323.04	4 206.56
L /mm	15	25	45
n /(r·min ⁻¹)	29.12	46.56	48.49
L /mm	25	35	55
n /(r·min ⁻¹)	17.78	29.28	38.51
L /mm	35	45	65
n /(r·min ⁻¹)	13.05	25.37	32.85
L /mm	45	55	70
n /(r·min ⁻¹)	10.88	21.39	31.20
L /mm		65	
n /(r·min ⁻¹)	17.12		

3.3.2 排肥性能评价

参照 JB/T 9783—2013《播种机外槽轮排肥器》规定的方法评价 EDEM 仿真试验的排肥性能,采用排肥均匀度变异系数作为排肥器排肥性能的评价指标。

排肥仿真试验结束后,选取模拟地面 2 000 mm 的区域为排肥效果的取样区域,在模拟地面上设置 Grid Bin Group,将该区域横向均匀的划分为 10 个相同的单元网格,每个网格尺寸为 600 mm × 200 mm × 50 mm,并对每个单元网格内的肥料颗粒总质量进行统计,并计算排肥器排肥变异系数^[21]为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n - 1}} \times 100\% \quad (7)$$

其中

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$$

式中 m_i ——第 i 个网格单元内的肥料质量, g
 \bar{m} ——网格单元内肥料颗粒的平均质量
 N ——采样网格单元数目,此处 N 取 10
 σ ——排肥器排肥均匀度变异系数, %

排肥均匀性变异系数 σ 作为评价排肥稳定性和均匀性指标, σ 越小,排肥器稳定性和均匀性越好。

3.3.3 仿真结果分析

根据设计试验,对 3 个目标施肥量不同控制序列组合排肥过程进行了仿真试验,并对其排肥过程的排肥均匀性进行分析,得到螺旋外槽轮排肥器的排肥变异系数,如图 10 所示。

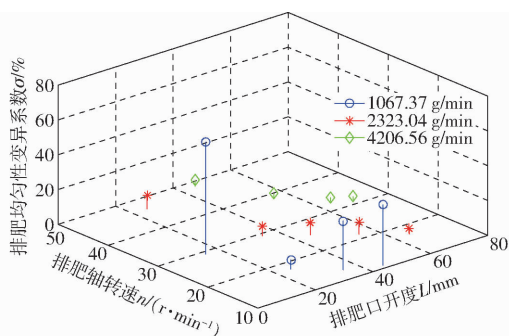


图 10 螺旋外槽轮排肥器不同控制序列下的排肥变异系数

Fig. 10 Coefficient of variation of spiral fluted-roll fertilizer distributor at different control sequences

由表 4 可知,当目标排肥量为 1 067.37 g/min 时,在控制序列为(25 mm, 17.78 r/min)处排肥均匀性变异系数最小,为 5.27%,此时排肥稳定性最好;在控制序列为(15 mm, 29.12 r/min)下,σ 为 64.58%,此时开度较小,转速相对较高,螺旋外槽轮充肥性能较差,导致排肥稳定性较低,甚至引起排肥

表 4 同目标排肥量下不同控制序列的排肥性能

Tab. 4 Fertilization performance at different control sequences for the same target rate

控制序列	目标排肥量/(g·min ⁻¹)		
	1 067.37	2 323.04	4 206.56
L/mm	15	25	45
n/(r·min ⁻¹)	29.12	46.56	48.49
σ/%	64.58	7.57	3.70
L/mm	25	35	55
n/(r·min ⁻¹)	17.78	29.28	38.51
σ/%	5.27	5.54	2.79
L/mm	35	45	65
n/(r·min ⁻¹)	13.05	25.37	32.85
σ/%	28.05	7.05	2.08
L/mm	45	55	70
n/(r·min ⁻¹)	10.88	21.39	31.20
σ/%	34.96	6.87	2.14
L/mm		65	
n/(r·min ⁻¹)		17.12	
σ/%		3.46	

过程断条;在控制序列 $L = 45$ mm, $n = 10.88$ r/min 下,σ 为 34.96%,此时开度较大,转速较低,导致排肥过程脉动明显,排肥稳定性较差。因此,在 Q_1 目标排肥量,控制序列选择对排肥性能的影响较大。

当目标排肥量为 2 323.04 g/min 时,螺旋外槽轮排肥稳定性随着开度的增大、转速的减小呈现下降趋势,且在控制序列 $L = 65$ mm, $n = 17.12$ r/min 下,σ 最小,为 3.46%,此时排肥稳定性最好。

当目标排肥量为 $Q_3 = 4 206.56$ g/min 时,排肥均匀性变异系数 σ 均小于 4%,整体具有较高的排肥稳定性,且在控制序列 $L = 65$ mm, $n = 32.85$ r/min 下,σ 最小,为 2.08%。因此在 Q_3 目标排肥量,控制序列选择对排肥稳定性的影响较小。

4 结论

(1) 在双变量螺旋外槽轮排肥器排肥装置上进行了不同排肥口开度、排肥轴转速的定时排肥试验,构建了基于 GRNN 的排肥口开度 L 、排肥轴转速 n 为输入的排肥量预测模型,并选取未参加训练的 20 个样本作为测试集,对模型进行验证。结果表明,模型决定系数达 0.999 4,平均相对误差为 3.56%。

(2) 研究了螺旋外槽轮排肥器的控制序列不同开度、转速的组合对排肥性能的影响规律,应用 EDEM 软件构建了螺旋排肥器排肥模型,并进行了同一目标施肥量下,不同控制序列的排肥仿真试验。仿真结果表明,当目标施肥量较小时,小开度、大转速组合的控制序列充肥性能较差,排肥稳定性较低;大开度、小转速组合的控制序列脉动性显著,排肥稳定性也较低。目标施肥量较大时,控制序列选择对外槽轮排肥稳定性的影响较小,螺旋外槽轮排肥器具有较好的排肥稳定性。

(3) 双变量螺旋外槽轮排肥器的控制序列选择,对小目标施肥量影响显著,在进行控制序列选择时,尽量避免开度、转速的边界量,靠近开度转速控制中心。

参 考 文 献

- [1] 赵春江,薛绪掌,王秀,等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 7-12. ZHAO Chunjiang, XUE Xuzhang, WANG Xiu, et al. Advanced and prospects of precision agriculture technology system[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 7-12. (in Chinese)
- [2] BALAFOUTIS A, BECK B, FOUNTAS S, et al. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics[Z]. Basel: MDPI AG, 2017; 9, 1339.
- [3] COLAGO A F, MOLIN J P. Variable rate fertilization in citrus: a long term study[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(2): 169-191.
- [4] 施印炎,陈满,汪小岳,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 97-103. SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170712&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-

1298. 2017. 07. 012. (in Chinese)
- [5] 张汉林. 电动变量施肥控制系统的设计与试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2017.
ZHANG Hanlin. Design and test of a electronic variate-rate fertilization control system [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [6] 刘阳春, 张小超, 伟利国, 等. 一种变量施肥技术的实现及其台架试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 159-162.
LIU Yangchun, ZHANG Xiaochao, WEI Liguoguo, et al. Design and experiment of a variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 159-162. (in Chinese)
- [7] 陈立平, 黄文倩, 孟志军, 等. 基于CAN总线的变量施肥控制器设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 101-104.
CHEN Liping, HUANG Wenqian, MENG Zhijun, et al. Design of variable rate fertilization controller based on CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 101-104. (in Chinese)
- [8] 苑进, 刘成良, 古玉雪, 等. 基于相关向量机的双变量施肥控制序列优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 184-189.
YUAN Jin, LIU Chengliang, GU Yuxue, et al. Bivariate fertilization control sequence optimization based on relevance vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 184-189. (in Chinese)
- [9] 刘成良, 苑进, 刘建政, 等. 基于ARM和DSP的双变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 233-238.
LIU Chengliang, YUAN Jin, LIU Jianzheng, et al. ARM and DSP-based bivariable fertilizing control system design and implementation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 233-238. (in Chinese)
- [10] 宿宁. 精准农业变量施肥控制技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2016.
SU Ning. Variable-rate fertilization control technology research in precision agriculture [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [11] ALAMEEN A, AL-GAADI K A, TOLA E. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 160: 31-39.
- [12] SU N, XU T, SONG L, et al. Variable rate fertilization system with adjustable active feed-roll length[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2015, 8(4): 19-26.
- [13] 威武振, 王金星, 刘双喜, 等. 稻麦变量施肥机控制系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 50(8): 72-79.
QI Wuzhen, WANG Jinxing, LIU Shuangxi, et al. Design and experiment of control system for rice and wheat variable rate fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 50(8): 72-79. (in Chinese)
- [14] 威武振. 智能稻麦播种机变量施肥系统设计与研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2018.
QI Wuzhen. Design and experiment of control system for smart rice and wheat variable rate fertilizer applicator[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [15] YUAN J, LIU C, LI Y, et al. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(1): 33-41.
- [16] 陈满, 施印炎, 汪小岳, 等. 冬小麦双变量施肥控制策略研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 58-62.
CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Control strategy research of a winter wheat bivariate fertilization applicator [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(11): 58-62. (in Chinese)
- [17] 赵学观, 何亚凯, 王松林, 等. 双变量排肥系统充肥性能分析与试验研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 104-110.
ZHAO Xueguan, HE Yakai, WANG Songlin, et al. Fertilization filling performance analysis and experimental study of bivariate fertilizer drainage system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 104-110. (in Chinese)
- [18] YIP H, FAN H, CHIANG Y. Predicting the maintenance cost of construction equipment: comparison between general regression neural network and Box-Jenkins time series models[J]. Automation in Construction, 2014, 38: 30-38.
- [19] HUANG Y W, CHEN M Q, LI Y, et al. Modeling of chemical exergy of agricultural biomass using improved general regression neural network[J]. Energy, 2016, 114: 1164-1175.
- [20] 薛忠, 赵亮, 王凤花, 等. 基于EDEM的螺旋式排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 87-95.
XUE Zhong, ZHAO Liang, WANG Fenghua, et al. Study on the performance of spiral fertilizer distributor based on EDEM [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 87-95. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 汪博涛. 基于离散元法的外槽轮排肥器工作过程仿真与参数优化[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
WANG Botao. Parameter optimization and simulation of a fluted roller distributor based on EDEM[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forest University, 2017. (in Chinese)
- [23] 张家华. 基于离散元法的变量施肥机排肥器排肥过程仿真分析[D]. 石河子:石河子大学, 2015.
ZHANG Jiahua. Simulation of a variable-rate fertilization process based on EDEM[D]. Shihezi: Shihezi University, 2015. (in Chinese)
- [24] 刘勤华. 肥料颗粒流掺混与时滞排肥模型及预测控制研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2015.
LIU Qinhu. Granular fertilizer blending and lag distribution model predictive control research [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [25] 丁尚鹏. 基于离散元法的肥料调比与分层施肥仿真及试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
DING Shangpeng. Simulation and test of the fertilizer blending ratio and separated layer fertilization based on EDEM[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forest University, 2018. (in Chinese)
- [26] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.