

段洁利, 黄广生, 孙志全, 等. 香蕉假茎自动对靶精准施肥装置的设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 88-99.
DUAN Jieli, HUANG Guangsheng, SUN Zhiquan, et al. Design and experiment of precision fertilization device with automatic target for banana stalk[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 88-99.

香蕉假茎自动对靶精准施肥装置的设计与试验

段洁利¹, 黄广生¹, 孙志全², 王彪¹, 杨洲^{1,3}, 李洋¹, 袁浩天¹

(1 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 基础实验与实践训练中心, 广东 广州 510642;
3 嘉应学院/广东省山区特色农业资源保护与精准利用重点实验室, 广东 梅州 514000)

摘要:【目的】针对华南地区蕉园施肥模式不能满足农艺要求、施肥效率低以及施肥机械自动化程度低等问题, 设计一种香蕉假茎自动对靶精准施肥装置。【方法】根据蕉园实际沟施过程和农艺要求, 确定装置的控制原理和关键部件的安装位置, 并基于此建立施肥时间滞后模型; 对外槽轮排肥器结构进行创新设计, 建立排肥机构单圈排肥量和周期排肥量的数学模型, 并通过 EDEM 仿真对肥料运动特性进行验证。采用响应曲面优化方法对排肥机构的工作参数进行优化, 满足香蕉在不同生长时期的需肥要求, 并以施肥量变异系数、施肥长度变异系数和假茎中心偏移距离为评价指标, 进行最优参数组合下的田间试验, 进一步验证精准施肥装置的工作性能。【结果】确定排肥机构最优工作参数为: 排肥轴转速 85 r/min, 槽轮内芯初始有效工作长度 6 mm。田间试验结果表明, 施肥量变异系数和施肥长度变异系数均小于 4%, 假茎中心偏移距离平均值最高为 7.4 cm, 满足农艺要求。【结论】该施肥装置工作性能可满足香蕉施肥要求, 本研究可为蕉园精准施肥装置的设计提供参考。

关键词: 香蕉; 对靶; 施肥装置; 排肥机构; EDEM 仿真
中图分类号: S224.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)06-0088-12

Design and experiment of precision fertilization device with automatic target for banana stalk

DUAN Jieli¹, HUANG Guangsheng¹, SUN Zhiquan², WANG Biao¹, YANG Zhou^{1,3}, LI Yang¹, YUAN Haotian¹
(1 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Basic Experiment and Practice Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3 Jiaying University/Laboratory of Conservation and Precision Utilization of Characteristic Agricultural Resources in Mountainous Areas, Meizhou 514000, China)

Abstract: 【Objective】In order to solve the problems that the fertilization mode of banana orchard in South China does not meet the agronomic requirements, the fertilization efficiency and the automation level of fertilization machinery are low, a precision fertilization device with automatic target for banana stalk was designed. 【Method】According to the fertilization process and agronomic requirement of banana orchard, the control principle of the device and the installation location of key components were determined, and the time lag model related to fertilization was established. Through the innovative design of the fluted fertilizer distributor, the mathematical models of single cycle and periodic fertilization amount were established, and the motion characteristics of fertilizer were verified by EDEM simulation. In order to meet the fertilizer requirements of

收稿日期: 2021-08-09 网络首发时间: 2021-09-26 09:31:55
网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210924.1959.006.html>
作者简介: 段洁利 (1973—), 女, 副教授, 博士, E-mail: duanjieli@scau.edu.cn; 通信作者: 杨洲 (1972—), 男, 教授, 博士, E-mail: yangzhou@scau.edu.cn
基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFD1000104); 广东省基础与应用基础研究基金 (2020A1515010793); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS31-10)

banana at different growth stages, the response surface methodology was used to optimize the parameters of fertilizer discharging mechanism. The variation coefficient of fertilization amount, variation coefficient of fertilization length and offset distance from the center of banana stalk were used as the evaluation indexes. Field test was performed using the combination of optimization parameters to further verify the performance of the precision fertilization device. 【Result】 The optimal parameters were determined as follows: The rotational speed of fertilizer-distributor shaft was 85 r/min, and the initial length of inner core of fluted roller was 6 mm. The field test showed that the variation coefficients of fertilization amount and fertilization length were both below 4%, and the highest average offset distance from the center of banana stalk was 7.4 cm, meeting the agronomic requirements. 【Conclusion】 The working performance of the device can meet the requirements of banana fertilization. This study can provide references for the design of the precision fertilization device for banana orchard.

Key words: banana; target; fertilization device; fertilizer discharging mechanism; EDEM simulation

合理施肥是改善土壤质量的有效措施,对香蕉产量和品质的提高具有重要意义^[1]。目前,蕉园常用施肥方式为人工撒施或施肥机开沟定量施肥,这种传统的施肥方式会导致肥料的过施及偏施,存在肥量分布不均、肥料利用率低和施肥效果差等问题^[2-3],严重限制我国香蕉产业的发展,违背我国农业绿色可持续发展战略。

精准施肥技术是精准农业的核心内容,是实现化肥减施增效的重要途径^[4-6]。精准施肥技术在发达国家起步早、发展快,正朝着大型化、智能化和机电一体化的方向发展^[7-10]。如美国 John Deere 公司研制的 JD1910 型气力式种肥车与 JD1820 型免耕播种机配套,在作业时可根据监测系统实时显示种肥播施情况等信息,实现全电控精量播种变量施肥作业。法国 Kuhn 公司生产的 Axis 系列变量撒肥机采用 3S 技术自动生成肥料撒施分布信息处方图,并通过 EMC 控制系统实时调节撒肥盘开度与角度,实现高效精准变量施肥作业^[8]。国内对精准变量施肥技术的研究起步相对较晚,直到 20 世纪 90 年代末才开始了相关技术的引进与创新研究,但总体发展态势迅猛,成为近些年的研究热点^[11-20]。施印炎等^[11]利用近地光谱探测技术开发了稻麦精准变量施肥控制系统,设计了可实现常规槽轮排肥器转速和开度双调节控制的排肥执行机构,有效提高了施肥控制精度;张信等^[15]设计了一种外槽轮体积可自动调节的排肥装置,通过改变槽轮体积实现变量施肥,试验证明用数学模型推导的理论排肥量与实际排肥量的最大误差为 7.7%;杨硕等^[18]利用高速摄影技术设计了果园对靶变量排肥系统,该系统可实现果园靶标实时探测、对靶精量排肥控制和排肥故障分析等功能。综合上述研究可以发现,国内对精准施肥技术

的研究侧重于变量排肥机构的优化设计和控制系统的开发,鲜有结合作物根系分布特征与施肥量关系的变量施肥装置的研制,且目前应用相对成熟的精准施肥装置主要作业对象是水稻、小麦、玉米等大田作物,需要搭载在稳定的大中型施肥机械平台,并不适合丘陵山地蕉园的精准施肥作业。

本文根据香蕉根系水平分布近似正态分布、不同位置根系吸收肥料能力不同这一特点^[21-22],设计了一种搭载于小型开沟施肥覆土一体机,可实现香蕉假茎自动对靶、非连续性正态施肥以及满足香蕉不同肥量需求的精准施肥装置,以期为丘陵山区蕉园的精准变量施肥提供技术支撑。

1 香蕉施肥方案

香蕉是速生快长、投产早、产量高的大型草本果树,香蕉中杆品种生长周期主要分为营养体生长期、孕蕾抽蕾期、供蕾期 3 个时期,不同生长时期肥量需求不同。香蕉施肥分为根际施肥和根外追肥,以根际施肥为主,根外追肥为辅。对于以宽窄行高畦种植为主要种植模式的丘陵山区蕉园而言,沟施是其进行根际施肥的主要施肥方式。常规沟施是指在离蕉株 30~100 cm 处,开一条宽 15~25 cm,长 35~50 cm,深 8~15 cm 的弧形小沟,然后将肥料均匀撒在沟内并覆土^[23]。

香蕉根系是吸收水分、养分的主要器官,其分布较广。在水平方向上,香蕉根系可延伸到树冠滴水线以外,主要分布于距蕉头 0.9 m 的范围内;在垂直方向上,大部分根系分布在距离土壤表层 30 cm 内,少部分根系分布较深,其中,分布在球茎上方集中在 30~60 cm 环带内的根系称为活性根,具有较强吸收水分营养的能力^[24]。对于不同生长期的香

蕉，其根系分布有所差异，但基本特征符合上述根系构型。因此本文以宝岛蕉中杆品种为作业对象，结合香蕉种植模式、不同生长时期的施肥农艺要求和根系构型，制定一种条开沟非连续正态分布施肥

方案，如图 1 所示，只对图中的绿色椭圆段施肥，在活性根区域施肥量最大，无根空白区域不施肥。该种施肥方式能保证香蕉根系充分地吸收肥料养分，有利于香蕉的生长发育，提高肥料的利用率。



图 1 施肥方案
Fig. 1 Fertilization scheme

2 精准施肥装置总体结构与工作原理

精准施肥装置由控制系统、探测系统、排肥执行机构以及人机交互模块组成，主要包括液晶串口屏、控制器、步进电缸、排肥器、超声波传感器、旋转编码器、电机等器件，装置总体构成示意图如图 2 所示。其中，液晶串口屏负责人机交互；超声波传感器负责探测目标果树，获取施肥位置信息；旋转编码器负责监测前进速度；控制器负责接收探测信号

和发送控制指令；排肥执行机构负责将肥料施入沟内。当该装置搭载在小型开沟施肥覆土一体机上作业时，需要将排肥轴和施肥机开沟刀轴以链传动的方式连接，并设置排肥离合装置以控制排肥器是否工作。本文设计的精准施肥装置尚处于研究阶段，故未直接搭载到施肥机上，而是另设电机驱动排肥器工作。精准施肥装置的工作过程：施肥作业开始前，根据目标果树所处的生长时期，预先在液晶串口屏上设定单株香蕉施肥量和施肥长度。在施肥平

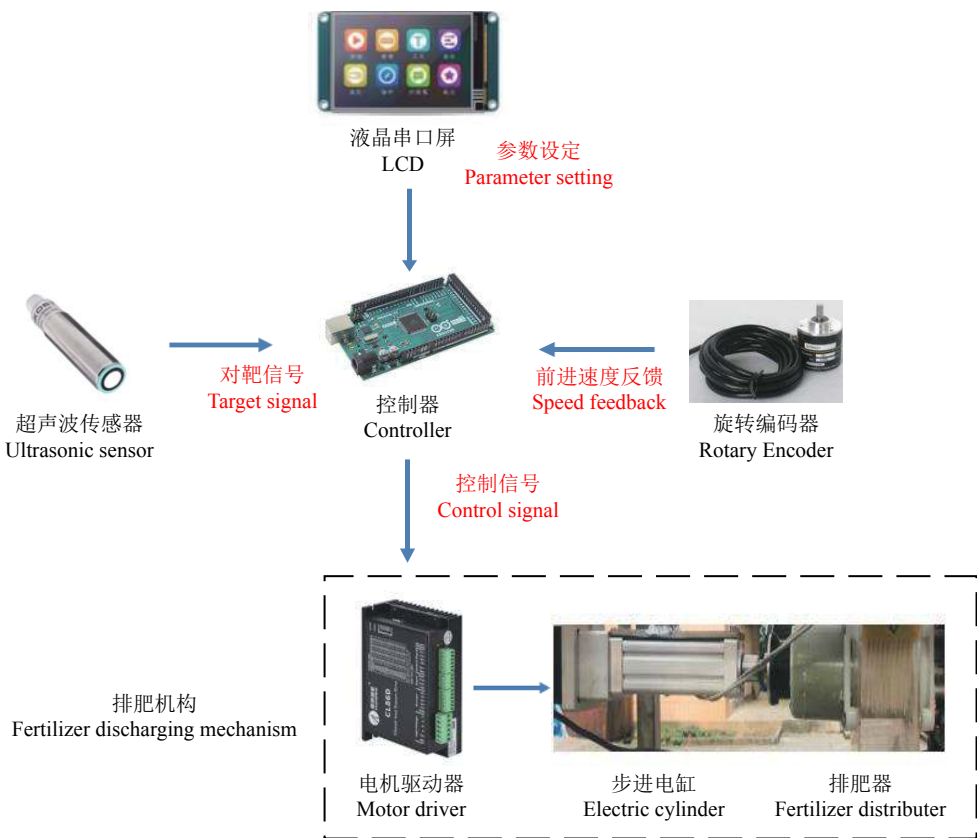


图 2 精准施肥装置结构示意图
Fig. 2 Structural diagram of precision fertilization device

台前进过程中,当超声波传感器探测到目标果树时,控制器接收到探测信号并立即向电机和步进电缸发送控制指令驱动排肥器工作,最后排肥器将定量定长的颗粒肥料以正态分布的形式对应施加在目标果树假茎中心附近,至此完成单株香蕉施肥作业,排肥器停止工作,直到下一个施肥信号出现时,开始下一个周期的施肥作业,即在连续前进的过程中实现非连续正态分布的精准变量施肥。

3 关键部件的设计及参数模型的建立

3.1 排肥机构设计

3.1.1 结构原理 目前,小型果园施肥机上最常用的排肥器为外槽轮排肥器,而现有的外槽轮排肥器多是通过改变排肥轴转速的方法来实现变量排肥,脉动较为明显,在低速时尤其如此。本文对外槽轮排肥器进行创新改进,改进后的排肥机构如图 3

所示。内芯挡环通过螺钉固定在排肥器外壳一侧,用于限制槽轮内芯的轴向移动,使其只有一个绕轴旋转的自由度;外芯支撑板用于减小槽轮外芯轴向往复移动时产生的振动,保证机构运动的稳定性;2 个半圆形垫片通过螺钉固定在槽轮外芯一侧,并与法兰以间隙配合的方式连接,保证槽轮外芯的轴向移动与绕轴旋转互不干涉;电缸推杆通过法兰与槽轮外芯连接控制其轴向运动。工作时,肥料由于重力作用经槽轮初始开口填充到槽轮内芯的凹槽内,在槽轮内外芯同时绕轴作定速转动的作用下,肥料依次填充不同的凹槽,并在齿槽的强制推动下经导流舌从排肥管排出。槽轮外芯除了和内芯作同步转动外,还在电缸推杆的推动下沿着轴向作往复周期移动,往复运动 1 次为 1 个排肥周期,通过改变槽轮内芯有效工作长度来改变单位时间内槽轮内芯凹槽的肥料颗粒填充数,进而实现变量施肥。

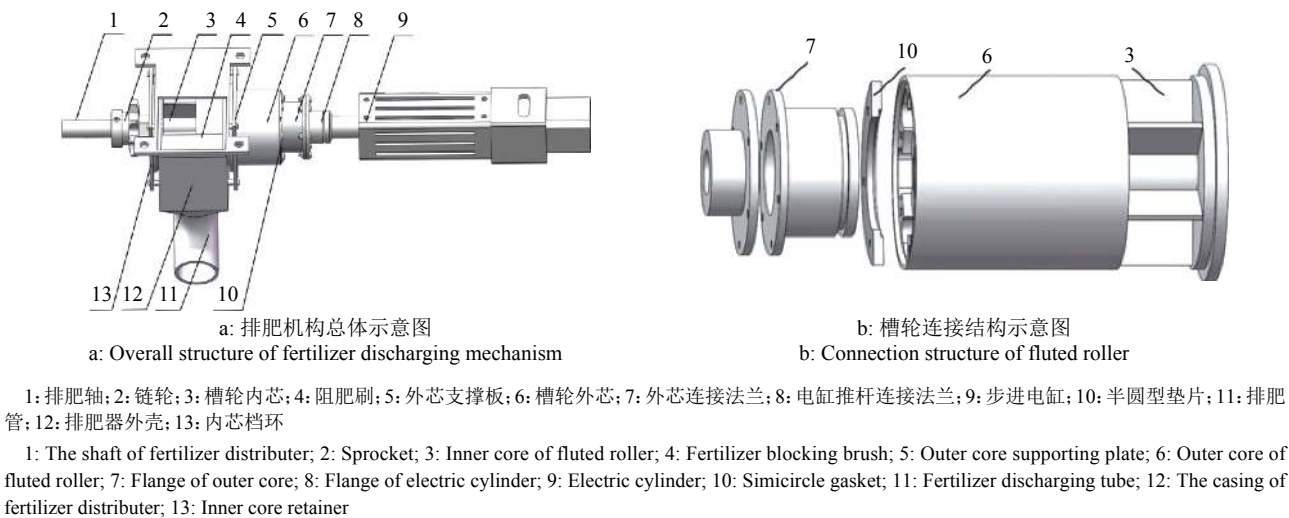


图 3 排肥机构结构示意图
Fig. 3 Structural diagram of fertilizer discharging mechanism

3.1.2 排肥量参数模型构建 槽轮的单圈排肥量是衡量排肥器工作性能的一个重要指标,根据槽轮式排肥器的实际工作情况,槽轮的单圈排肥量(Q)为强制层单圈排肥量(Q_1)与带动层单圈排肥量(Q_2)之和,即 $Q = Q_1 + Q_2$ 。假设没有轴向阻力及不考虑转速的情况下,单圈排肥量计算过程如下:

强制层单圈排肥量(Q_1)和带动层单圈排肥量(Q_2)分别为:

$$Q_1 = \frac{\pi d l \gamma \alpha(n)}{p} f, \tag{1}$$

$$Q_2 = \pi d l \gamma \left\{ \left[C(n) + \frac{d}{2} \right]^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right\}, \tag{2}$$

式中: d 为外槽轮直径,cm; l 为槽轮内芯有效工作长

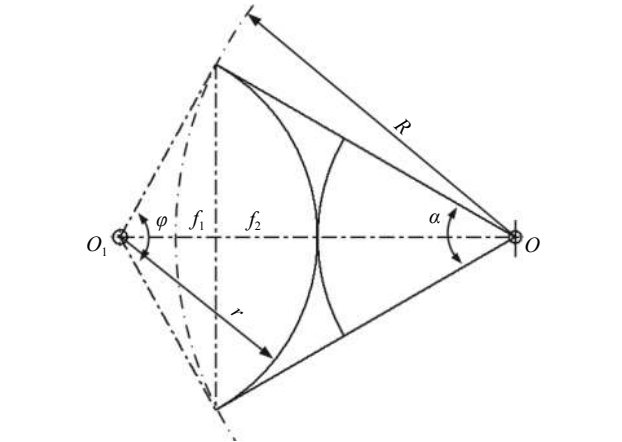
度,cm; γ 为肥料容重, g/cm^3 ; $\alpha(n)$ 为肥料填充系数; f 为单个凹槽截面积, cm^2 ; p 为槽轮凹槽节距,cm; $C(n)$ 为带动层特性系数。

单个凹槽截面积(f)可由槽轮的几何图形求得,图 4 为槽轮断面剖视图。

根据图 4 中的几何关系,可推导出槽轮单个凹槽截面积(f)为:

$$f = f_1 + f_2 = \frac{d^2}{8} (\alpha - \sin \alpha) + \frac{r^2}{2} (\varphi - \sin \varphi), \tag{3}$$

式中: f_1 、 f_2 分别表示槽轮凹槽截面顶部和底部面积, cm^2 ; α 为 2 个排肥齿脊间的圆心角弧度; r 为辅助圆的半径,cm; φ 为辅助圆与 α 相对应的圆心角弧度。



R 为外槽轮半径, cm; r 为辅助圆 O_1 的半径, cm; α 为 2 个排肥齿脊间的圆心角弧度; φ 为辅助圆 O_1 中与 α 相对应的圆心角弧度; f_1 表示槽轮凹槽截面顶部面积, cm^2 ; f_2 表示槽轮凹槽截面底部面积, cm^2

R is the radius of fluted roller, cm; r is the radius of the auxiliary circle O_1 , cm; α is the center angle radian between the two tooth ridges of fluted roller; φ is the center angle radian of the auxiliary circle O_1 corresponding to α ; f_1 is the top area of the groove section of fluted roller, cm^2 ; f_2 is the bottom area of the groove section of fluted roller, cm^2

图 4 槽轮断面剖视图

Fig. 4 Section view of fluted roller

由于 $\alpha(n)$ 和 $C(n)$ 是与转速有关的参数, 为减小排肥量计算的误差, 本排肥器选用阻肥刷代替排肥舌, 排肥舌只用于肥料导流, 所以带动层排肥量 $Q_2 \approx 0$, 则理论单圈排肥量 (Q) 为:

$$Q = \pi d l \gamma \frac{\alpha(n)}{p} \left[\frac{d^2}{8} (\alpha - \sin \alpha) + \frac{r^2}{2} (\varphi - \sin \varphi) \right] \quad (4)$$

在排肥机构结构尺寸确定的情况下, 排肥器周期排肥量 (Q_T) 与槽轮内芯有效工作长度 (l_t)、排肥轴转速 (N) 以及排肥周期 (T) 有关。当转速一定时, 即与槽轮外芯的初始位置、最终位置以及槽轮外芯的轴向移动周期有关, 则在周期 T 内的周期排肥量 (Q_T) 为:

$$Q_T = \frac{\pi f d l_t}{60 p} \alpha(n) \gamma N T, \quad (5)$$

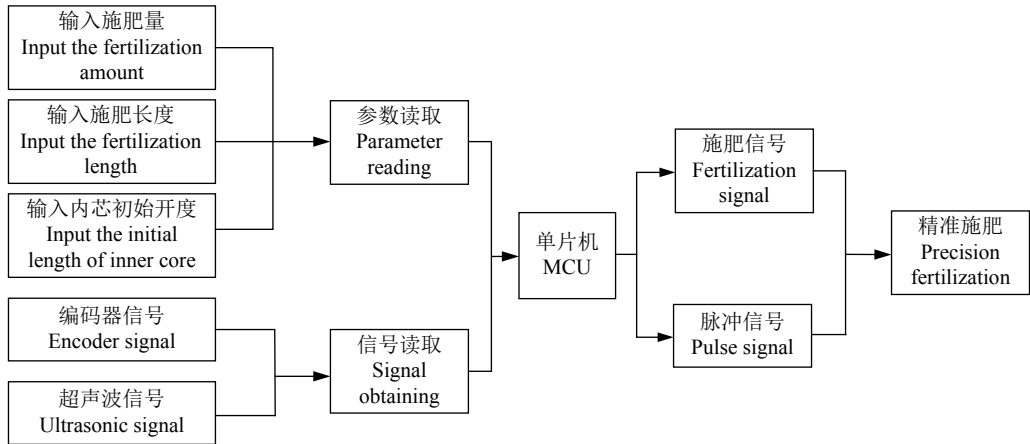


图 5 测控系统设计框图

Fig. 5 Design diagram of control system

其中, l_t 表示槽轮内芯有效工作长度, 是一个随时间变化的参数, 有如下关系:

$$\begin{cases} l_t = l_{\min} + \varphi(t) \\ \varphi(t) = \frac{2(l_{\max} - l_{\min})}{T} t + l_{\min} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $l_{\min}$ 表示槽轮内芯最小有效工作长度 (槽轮外芯初始位置), mm; $l_{\max}$ 表示槽轮内芯最大有效工作长度 (槽轮外芯最终位置), mm; $\varphi(t)$ 表示 t 时刻槽轮外芯轴向移动距离, mm。

由于槽轮外芯沿着轴向作匀速运动, 结合式 (5)、(6), 积分后化简, 可得周期 (T) 内的周期排肥量 (Q_T) 为:

$$Q_T = \frac{\pi f d \gamma (l_{\max} + l_{\min})}{120 p} \alpha(n) N T. \quad (7)$$

3.2 测控系统设计

3.2.1 设计框图和主程序流程 测控系统硬件部分主要由液晶串口屏、超声波传感器、旋转编码器和单片机组成, 要求实现对靶检测和排肥控制两部分功能。为了提高对靶检测的精准性, 结合香蕉沟施农艺要求 (沟施离蕉株的距离为 30~100 cm), 选取的超声波传感器探测范围应小于 100 cm, 并且波束角不宜过大。为了满足香蕉不同生长时期的施肥需求, 在液晶串口屏中需实现施肥量、施肥长度、槽轮内芯初始开度等参数的设置, 并能实时显示机具前进速度和槽轮开度。系统选取 Arduino 单片机为核心控制单元, 用来读取施肥前预先在液晶串口屏中设定的相关参数以及接收超声波传感器和旋转编码器的探测信号, 通过施肥时间滞后模型的算法计算延迟时间, 然后输出脉冲信号驱动电机转动、控制电缸移动速度、正反转时刻和启停时刻, 实现非连续性正态分布施肥。测控系统设计框图和测控系统主程序流程图分别如图 5 和图 6 所示。

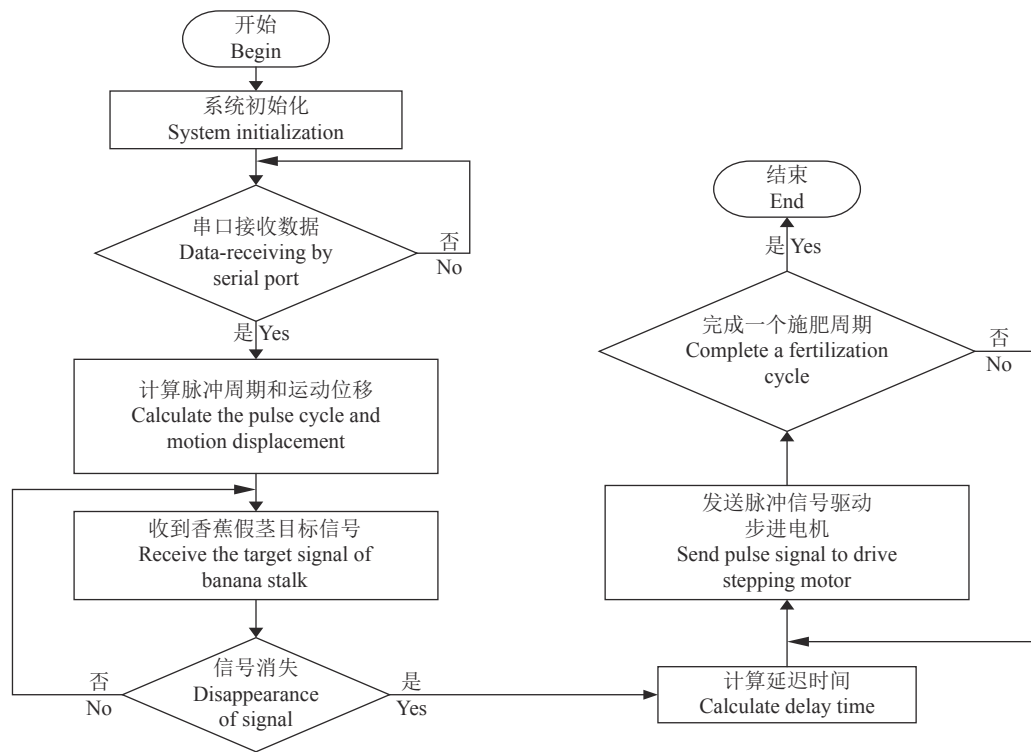


图 6 测控系统主程序流程图

Fig. 6 Program flow chart of control system

3.2.2 施肥时间滞后模型 当超声波传感器探测到目标果树时, 控制器读取到超声波信号, 将对步进电机发送排肥指令。但为保证精准定位施肥, 需要考虑步进电机推动槽轮外芯运动的起始时刻, 所以当控制器接收到超声波探测信号时, 不能立刻驱动电机和步进电机运动, 需要给其一定的滞后时间。施肥滞后时间与施肥机的前进速度、超声波传感器的波束角和安装位置、排肥器出肥口离地面的距离以及排肥器离香蕉假茎的距离等有关。施肥对靶探测示意图如图 7 所示。

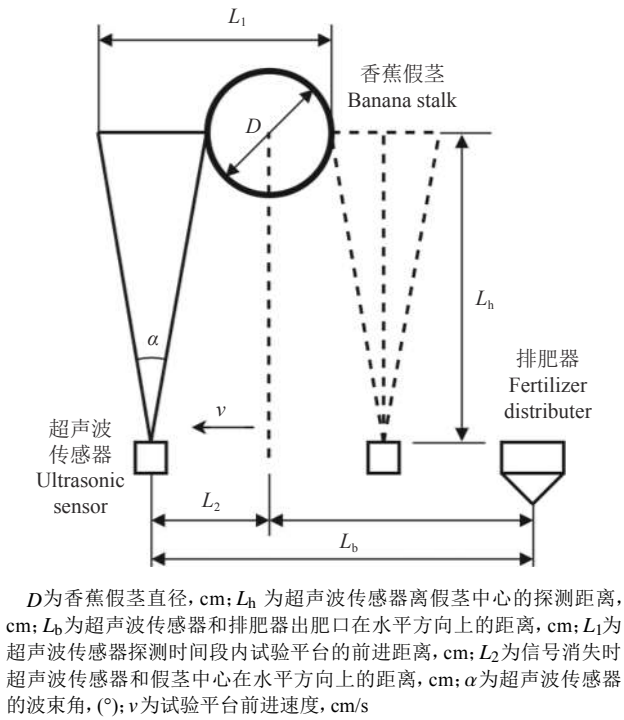
假设香蕉的最大施肥长度为 $L_{\max}$, 超声波传感器和排肥器出肥口在水平方向上的距离 (L_b) 应该满足以下条件:

$$L_b \geq L_{\max} + L_h \cdot \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{D}{2}, \tag{8}$$

式中: L_h 为超声波传感器离假茎中心的探测距离, cm; α 为超声波传感器的波束角, ($^\circ$); D 为香蕉假茎直径, cm。

设超声波传感器开始探测到香蕉假茎时间为 t_1 , 探测信号消失时间为 t_2 , 根据系统工作原理, 结合施肥对靶探测示意图, 求出当探测信号消失时, 需要的施肥滞后时间(t)为:

$$t = \frac{L_b}{v} - \frac{1}{2} \left(t_2 - t_1 + \frac{L}{v} \right) + \sqrt{\frac{2H}{g}}, \tag{9}$$



D 为香蕉假茎直径, cm; L_h 为超声波传感器离假茎中心的探测距离, cm; L_b 为超声波传感器和排肥器出肥口在水平方向上的距离, cm; L_1 为超声波传感器探测时间段内试验平台的前进距离, cm; L_2 为信号消失时超声波传感器和假茎中心在水平方向上的距离, cm; α 为超声波传感器的波束角, ($^\circ$); v 为试验平台前进速度, cm/s

D is the diameter of banana stalk, cm; L_h is the distance from ultrasonic sensor to the center of the banana stalk, cm; L_b is the horizontal distance between the ultrasonic sensor and the outlet of the fertilizer distributor, cm; L_1 is the moving distance of the test platform during the ultrasonic sensor detection period, cm; L_2 is the horizontal distance between the ultrasonic sensor and the stalk center when the signal disappears, cm; α is the beam angle of the ultrasonic sensor, ($^\circ$); v is the working speed of the test platform, cm/s

图 7 对靶探测示意图

Fig. 7 Schematic diagram of target detection

式中： L 为预先设定的施肥长度，cm； H 为排肥器出肥口离地面的距离，cm； v 为试验平台前进速度，cm/s。

4 仿真试验与分析

排肥机构作为精准施肥装置的关键执行部件，其作业性能优良与否直接影响施肥量和施肥长度的准确性和稳定性。本文通过建立排肥机构仿真模型，应用 EDEM 离散元仿真软件进行多因素试验来实现排肥机构的参数优化。

4.1 EDEM 仿真模型

4.1.1 排肥器几何模型 为保证仿真的准确性并缩短仿真时间，将与肥料颗粒无接触的部件省去，在三维建模软件 SolidWorks 中以 1:1 的比例对排肥器进行实体建模，并在距排肥口下方 40 mm 处设置一段长 5 500 mm，宽 100 mm 的模拟地面用来收集肥料，以便后续对排肥量、排肥长度和肥料分布规律的观察与分析，建模完成后以.IGS 格式导入到 EDEM 软件中，以 Mesh 显示的排肥器几何模型如图 8 所示。

4.1.2 仿真参数设置 本次试验的肥料与肥料颗粒，肥料颗粒与排肥器、模拟地面之间均采用 Hertz-

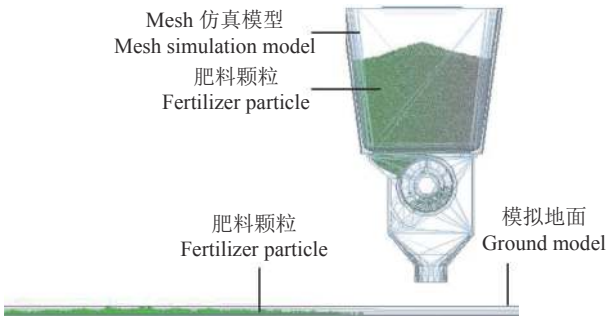


图 8 排肥器几何模型

Fig. 8 Geometric modeling of fertilizer distributor

mindung 无滑动接触模型^[25]，查阅相关文献并结合实验室相关研究成果^[22, 26-30]，确定模型参数设置如表 1 所示。按表 1 配置模型的材料属性，并在肥箱正上方建立肥料工厂，肥料工厂以正态分布的形式在 1 s 内动态生成肥料颗粒 60 000 粒。根据试验条件将槽轮内外芯绕轴旋转速度设置到所需值，将模拟地面的前进速度设置成 0.3 m/s，总仿真时间设置为 3 个槽轮外芯移动周期，设置时间步长为瑞利步长的 20%，数据记录时间为 0.05 s，仿真网格为 2 倍的颗粒半径。

表 1 全局变量参数设置

Table 1 Setting of global variable parameters

项目 Item	直径/mm Diameter	泊松比 Poisson ratio	剪切模量/Pa Shear modulus	密度/ (kg·m ⁻³) Density	恢复系数 Recovery coefficient	静摩擦系数 Static friction coefficient	动摩擦系数 Kinetic friction coefficient
肥料颗粒 Fertilizer	3.37	0.25	1.0×10 ⁷	1 330			
排肥器 Fertilizer distributor		0.43	1.3×10 ⁹	1 240			
肥料颗粒-肥料颗粒 Fertilizer-fertilizer					0.11	0.30	0.10
肥料颗粒-排肥器 Fertilizer-fertilizer distributor					0.41	0.32	0.18
肥料颗粒-模拟地面 Fertilizer-ground model					0.30	1.26	1.27

4.2 仿真试验与结果分析

4.2.1 仿真试验设计 以槽轮内芯初始有效工作长度 (A)、槽轮内芯最大有效工作长度 (B)、槽轮外芯移动周期 (C) 和排肥轴转速 (D) 为试验因素，以施肥量 (Y) 为试验指标，根据宝岛蕉中杆品种施肥要求施肥量 100~300 g、施肥长度 40~120 cm^[23]、施肥机实际作业速度 0.25~0.30 m/s、宽窄行种植株距 2.0~2.2 m、结合排肥轴转速要求和排肥量参数模型，选取恰当的水平进行四因素三水平正交试验，

试验因素和水平如表 2 所示。

4.2.2 试验结果 本试验采用 Box-Behnken Design(BBD) 模型设计试验方案，依据表 2 设计的试验方案和仿真结果如表 3 所示。

由表 3 可知，试验因素在不同水平下排肥量各不相同，当槽轮内芯初始有效工作长度和最大有效工作长度分别为 10 和 40 mm，槽轮外芯移动周期为 2 s，排肥轴转速为 50 r/min 时，最小排肥量为 80.37 g；当槽轮内芯初始有效工作长度和最大有效工作长

表 2 试验因素和水平表
Table 2 List of test factors and levels

水平 Level	因素 Factor			
	槽轮内芯初始有效 工作长度/mm	槽轮内芯最大有效 工作长度/mm	槽轮外芯移动 周期/s	排肥轴转速 (r·min ⁻¹)
	Initial effective working length of inner core	Maximum effective working length of inner core	Movement cycle of outer core	Rotational speed of fertilizer-distributer shaft
	(A)	(B)	(C)	(D)
-1	5	30	2	50
0	10	40	3	75
1	15	50	4	100

表 3 试验方案和结果
Table 3 Test plan and results

试验序号 Test No.	A	B	C	D	排肥量/g Fertilization amount
1	0	-1	0	1	167.04
2	-1	0	-1	0	98.98
3	1	0	-1	0	123.65
4	0	1	1	0	270.04
5	-1	1	0	0	185.34
6	0	0	-1	1	140.93
7	0	1	0	-1	144.92
8	0	0	1	-1	159.70
9	0	0	0	0	107.13
10	0	1	-1	0	136.28
11	1	0	1	0	245.21
12	-1	-1	0	0	112.70
13	1	1	0	0	221.92
14	1	0	0	1	234.64
15	0	0	1	1	280.96
16	1	0	0	-1	132.81
17	0	0	-1	-1	80.37
18	0	-1	0	-1	93.45
19	1	-1	0	0	151.00
20	-1	0	0	1	187.33
21	0	-1	1	0	175.50
22	0	-1	-1	0	87.55
23	-1	0	0	-1	106.87
24	-1	0	1	0	198.03
25	0	1	0	1	257.22

度分别为 10 和 40 mm, 槽轮外芯移动周期为 4 s, 排肥轴转速为 100 r/min 时, 最大排肥量为 280.96 g。排肥量在 80.37~280.96 g 之间变化, 符合宝岛蕉施肥农艺要求, 进一步验证了试验所选取的水平合理。

4.2.3 回归方程方差分析 将试验结果用 Design Expert 软件进行二次回归方程方差分析, 可得表 4 所示的排肥量方差分析表。根据表 4 可知, 槽轮内芯初始有效工作长度 (A)、槽轮内芯最大有效工作

表 4 排肥量方差分析表
Table 4 Variance analysis of fertilizer discharge

方差来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	86473.33	14	6176.67	10161.27	<0.0001
<i>A</i>	4032.60	1	4032.60	6634.06	<0.0001
<i>B</i>	15299.59	1	15299.59	25169.46	<0.0001
<i>C</i>	36485.04	1	36485.04	60021.77	<0.0001
<i>D</i>	25208.33	1	25208.33	41470.40	<0.0001
<i>AB</i>	0.74	1	0.74	1.22	0.2958
<i>AC</i>	126.68	1	126.68	208.39	<0.0001
<i>AD</i>	114.17	1	114.17	187.82	<0.0001
<i>BC</i>	524.64	1	524.64	863.09	<0.0001
<i>BD</i>	374.62	1	374.62	616.28	<0.0001
<i>CD</i>	921.12	1	921.12	1515.34	<0.0001
<i>A</i> ²	2523.14	1	2523.14	4150.83	<0.0001
<i>B</i> ²	2618.56	1	2618.56	4307.81	<0.0001
<i>C</i> ²	2496.20	1	2496.20	4106.52	<0.0001
<i>D</i> ²	2271.47	1	2271.47	3736.81	<0.0001
残差 Residual	6.08	10	0.61		
总误差 Total error	9.41	24			

长度 (*B*)、槽轮外芯移动周期 (*C*) 和排肥轴转速 (*D*) 模型单因素均极显著 ($P<0.001$); 模型两因素交互相 *AC*、*AD*、*BC*、*BD*、*CD*、*A*²、*B*²、*C*²、*D*² 极显著 ($P<0.001$), *AB* 不显著。通过剔除对排肥量不显著的 *AB* 项, 得排肥量二次回归模型为:

$$Y = 107.13 + 18.33A + 35.71B + 55.14C + 45.83D + 5.63AC + 5.34AD + 11.45BC + 9.68BD + 15.17CD + 29.89A^2 + 30.45B^2 + 29.73C^2 + 28.36D^2.$$

(10)

4.2.4 响应曲面分析 为直观分析在槽轮内芯初始有效工作长度和最大有效工作长度二因素作用下排肥量的变化情况, 现将试验因素中的排肥轴转速和槽轮外芯移动周期固定于试验设计水平点。对 3 个不同水平的排肥轴转速与槽轮外芯移动周期的交互进行结果分析可得出, 50 r/min 的转速下无法满足最大施肥量, 100 r/min 转速下无法满足最小施肥量, 因此选择排肥轴转速 75 r/min, 在不同的槽轮外芯移动周期下, 对槽轮内芯初始有效工作长度和最大有效工作长度二因素进行响应曲面分析, 3D 响应图、等高线图见图 9, 可直观地看出排肥轴转速为 75 r/min 时, 在不同排肥周期下槽轮内芯初始长度和最大长度二因素对施肥量的交互作用。根

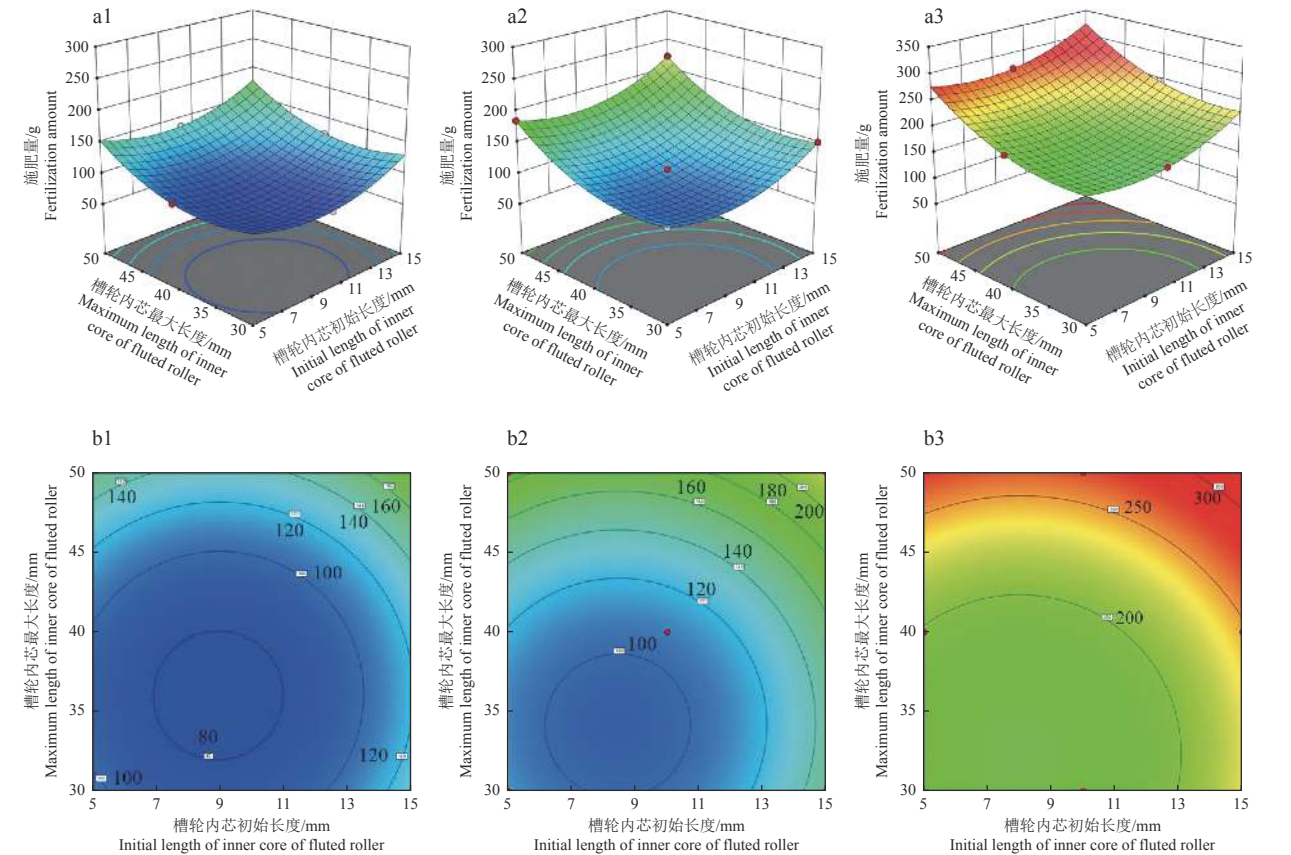
据施肥机实际施肥作业速度为 0.25~0.30 m/s, 则在排肥周期为 2 s 时, 施肥量可达到 80~160 g 及以上, 施肥长度为 50~60 cm, 用于营养体生长期; 在排肥周期为 3 s 时, 施肥量可达到 100~200 g 及以上, 施肥长度为 75~90 cm, 用于孕蕾抽蕾期; 在排肥周期为 4 s 时, 施肥量可达到 200~300 g 及以上, 施肥长度为 100~120 cm, 用于香蕉供蕾期。

4.2.5 排肥器工作参数优化 为得到最佳工作参数组合, 现设定香蕉营养体生长期施肥量 100 g, 施肥长度 60 cm; 香蕉孕蕾抽蕾期施肥量 200 g, 施肥长度 90 cm; 香蕉供蕾期施肥量 300 g, 施肥长度 120 cm。对施肥量 (*Y*) 进行目标优化, 优化方程式如下:

$$\begin{cases} 5 \leq A \leq 15 \\ 30 \leq B \leq 50 \\ 2 \leq C \leq 4 \\ 50 \leq D \leq 100 \\ Y = (Y_1, Y_2, Y_3) \end{cases}.$$

(11)

基于以上优化条件, 得到的最佳预测优化参数如表 5 所示。由表 5 可知, 优化后的排肥轴转速为 82.5~86.0 r/min, 则实际修改最优转速为 85 r/min; 槽轮内芯初始有效工作长度为 5.0~6.6 mm, 则实际修改最优槽轮内芯初始有效工作长度为 6 mm。



a1、a2 和 a3 分别为排肥周期 2、3、4 s 时的响应面 3D 图；b1、b2 和 b3 分别为排肥周期 2、3、4 s 时施肥量 (g) 的等高线图

a1, a2 and a3: 3D maps of response surfaces under the fertilization cycle of 2,3,4 s, respectively; b1, b2 and b3: Contour maps of fertilization amount (g) under the fertilization cycle of 2,3,4 s, respectively

图 9 槽轮内芯初始有效工作长度与最大有效工作长度对施肥量的交互作用

Fig. 9 Interactive effect of initial length and maximum length of inner core on fertilization amount

表 5 最佳参数优化结果

Table 5 Results of parameter optimization

序号 No.	A	B	C	D	排肥量/g Fertilization amount
1	5.7	38.6	2	82.5	100
2	5.0	48.7	3	86.0	200
3	6.6	50.0	4	85.4	300

5 田间试验

5.1 试验材料

为检验香蕉自动对靶精准施肥装置的可行性，并进一步验证仿真试验的准确性，搭建精准施肥装置试验平台如图 10a 所示，于 2021 年 1 月 10 日在广东省农业科学院的蕉园基地进行田间试验。试验选用香蕉品种为广西宝岛蕉，处于香蕉供蕾结果期，株距为 2 m；试验肥料为青海云天化国际化肥有限公司生产的尿素颗粒。试验当天天气晴朗，空气湿度低，试验地形较为平坦。

5.2 试验方法

预先对装置设定好仿真试验优化得出的最优

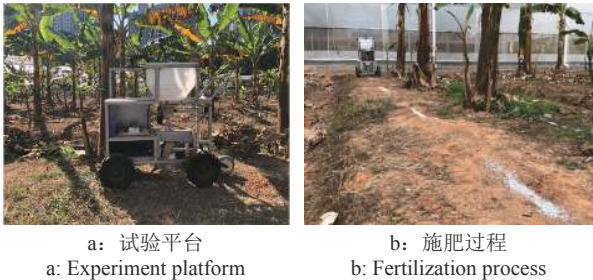


图 10 田间试验

Fig. 10 Field experiment

参数组合，即排肥轴转速为 85 r/min、槽轮初始有效工作长度为 6 mm，并设定试验平台前进速度为 0.3 m/s。对施肥量和施肥长度的 3 种施肥组合 (100g、

60 cm, 200 g、90 cm, 300 g、120 cm) 分别进行 5 次施肥试验, 每次试验对 3 株香蕉施肥, 并记录每次试验的施肥量、施肥长度和假茎中心偏移距离, 其中, 假茎中心偏移距离是指实际施肥的正态分布中心和香蕉假茎中心在水平投影方向的偏移距离。试验时采用减法称质量测量每 1 个排肥周期的施肥量, 即在施肥前记录肥箱中的肥料质量 m_1 , 在完成 1 个排肥周期的施肥作业后, 清理出肥箱和排肥器中剩余的肥料并称质量, 记录质量为 m_2 , 则第 1 个排肥周期的施肥量为 m_1-m_2 , 再将清理出的肥料重新倒入肥箱中, 开始下一个排肥周期的试验。依次类推, 记录 m_3 、 m_4 , 得出第 2 个排肥周期的施肥量为 m_2-m_3 、第 3 个排肥周期的施肥量为 m_3-m_4 。田间试验过程如图 10b 所示。

5.3 试验结果与分析

对田间试验记录的数据进行分析, 分别计算施

肥量、施肥长度和假茎中心偏移距离的平均值和变异系数, 结果如表 6 所示。由表 6 可知, 施肥量与施肥长度的变异系数均小于 4%, 精准施肥装置的工作稳定性较强。但施肥量与施肥长度均高于设定值, 这是由于外槽轮排肥器自身结构的原因, 在外槽轮停止转动时, 处于槽轮下方的肥料仍然通过肥料管流出来, 但这些肥料颗粒最多只能填满 1 个槽口, 误差在允许范围之内。假茎中心偏移距离的平均值最高为 7.4 cm, 符合实际作业要求。

由表 7 可知, 当施肥量分别为 100、200、300 g 时, 仿真施肥量与理论施肥量的相对误差分别为 1.4%、3.1% 和 2.5%, 田间试验施肥量与理论施肥量的相对误差分别为 5.1%、3.9% 和 2.8%, 均在允许的误差范围之内, 说明本研究设计的蕉园精准施肥装置的可靠性和稳定性较强, 可搭载于小型开沟施肥覆土一体机上用于蕉园施肥作业。

表 6 田间试验数据与结果¹⁾
Table 6 Data and results of field experiment

试验编号 No. of test	组别1 Group 1			组别2 Group 2			组别3 Group 3		
	施肥量/g	施肥长度/cm	假茎中心偏移距离/cm	施肥量/g	施肥长度/cm	假茎中心偏移距离/cm	施肥量/g	施肥长度/cm	假茎中心偏移距离/cm
	Fertilization amount	Fertilization length	Offset distance from the center of banana stalk	Fertilization amount	Fertilization length	Offset distance from the center of banana stalk	Fertilization amount	Fertilization length	Offset distance from the center of banana stalk
1	104.9	62.3	6.8	207.9	96.3	7.8	310.6	129.3	6.9
2	103.2	64.6	7.9	203.2	97.6	6.8	308.6	125.7	6.5
3	106.1	61.5	7.6	210.6	94.7	6.7	308.2	131.9	7.6
4	107.6	65.7	7.1	209.4	97.5	7.5	302.9	126.2	7.9
5	103.9	67.8	7.6	208.8	100.3	7.5	312.8	123.4	7.0
均值	105.1	64.3	7.4	207.9	97.2	7.2	308.6	127.3	7.1
Average									
变异系数/%	1.49	3.54	5.33	1.22	1.88	5.94	1.06	2.33	7.01
Coefficient of variation									

1) 组别1~3的理论施肥量分别为100、200和300 g, 理论施肥长度分别为60、90和120 cm
1)The theoretical fertilization amount of group 1 – 3 were 100, 200 and 300 g, and the theoretical fertilization lengths were 60, 90 and 120 cm, respectively

表 7 施肥量对比及误差分析
Table 7 Comparison and error analysis of fertilization amount

组别 Group	施肥量/g Fertilization amount			误差/% Error	
	理论 Theory	仿真 Simulation	实际 Field experiment	理论与实际施肥量 Fertilization amount between theory and field experiment	理论与仿真施肥量 Fertilization amount between theory and simulation
1	100	98.6	105.1	5.1	1.4
2	200	193.7	207.9	3.9	3.1
3	300	292.4	308.6	2.8	2.5

6 结论

1) 针对华南地区蕉园施肥模式不满足农艺要求, 施肥效率低以及施肥机自动化程度较低等问题, 设计了一种搭载在开沟施肥覆土一体机上, 可实现香蕉假茎自动对靶、非连续性正态施肥以及满足香蕉不同生长期肥量需求的精准施肥装置, 并对装置的关键部件排肥机构进行肥料仿真运动分析, 确定了影响排肥性能的主要因素, 采用响应曲面优化方法确定了排肥机构的最优工作参数: 排肥轴转速 85 r/min, 槽轮内芯初始有效工作长度 6 mm。

2) 最优参数组合下的田间试验表明: 施肥量和施肥长度的变异系数均小于 4%, 说明精准施肥装置较为稳定; 假茎中心偏移距离的平均值最高为 7.4 cm, 满足实际作业要求, 说明精准施肥装置的对靶精度符合要求。

参考文献:

[1] 何丹. 合理施肥与果园土壤质量提升探讨[J]. 南方农业, 2019, 13(12): 192-193.

[2] 赵凤亮, 邹刚华, 单颖, 等. 香蕉园化肥施用现状、面源污染风险及其养分综合管理措施[J]. 热带作物学报, 2020, 41(11): 2346-2352.

[3] 房丽萍, 孟军. 化肥施用对中国粮食产量的贡献率分析: 基于主成分回归 C-D 生产函数模型的实证研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17): 156-160.

[4] 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.

[5] 魏丽梅. 变量施肥机的研究意义[J]. 时代农机, 2018, 45(3): 12-13.

[6] 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.

[7] 初金哲, 庄卫东, 梁冉冉. 精准变量施肥技术发展与分析[J]. 农业机械, 2018(10): 68-71.

[8] 韩英, 贾如, 唐汉. 精准变量施肥机械研究现状与发展建议[J]. 农业工程, 2019, 9(5): 1-6.

[9] MALEKI R M, RAMON H, De BAERDEMAEKER J, et al. A study on the time response of a soil sensor-based variable rate granular fertiliser applicator[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 160-166.

[10] CHANG Y K, ZAMAN Q U, FAROOQUE A, et al. Sensing and control system for spot-application of granular fertilizer in wild blueberry field[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(2): 210-223.

[11] 施印炎, 陈满, 汪小昆, 等. 稻麦精准追肥机执行机构的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(6): 119-124.

[12] 陈满, 施印炎, 汪小昆, 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.

[13] 汪博涛, 白璐, 丁尚鹏, 等. 外槽轮排肥器关键工作参数对排肥量影响的仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(10): 1-6.

[14] 陈满, 金诚谦, 倪有亮, 等. 基于多传感器的精准变量施肥控制系统[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(1): 56-60.

[15] 张信, 李光林, 白秋薇, 等. 一种外槽轮体积自动可调的定量排肥装置设计与试验[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(8): 158-166.

[16] 杨洲, 朱卿创, 孙健峰, 等. 基于 EDEM 和 3D 打印成型的外槽轮排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 175-180.

[17] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 两级螺旋排肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 10-16.

[18] 杨硕, 王秀, 翟长远, 等. 支持种肥监测的变量施肥系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 145-153.

[19] 袁全春, 徐丽明, 牛丛, 等. 果园有机肥深施肥分层变量排肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 195-202.

[20] 赵硕, 宗泽, 刘刚. 基于电机驱动的定位施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 91-95.

[21] 杨洲, 欧治武, 孙健峰, 等. 基于香蕉根系分布特征的变量施肥机研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 1-10.

[22] 宋帅帅, 段洁利, 邹湘军, 等. 基于香蕉根系分布形态的变量排肥器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 11-18.

[23] 黄慧德. 香蕉需肥特点与施肥技术[J]. 世界热带农业信息, 2017(6): 51-55.

[24] 蒙海花, 常春荣. 常规施肥条件下香蕉根系时空特征[J]. 中国南方果树, 2020, 49(2): 49-53.

[25] 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.

[26] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(04): 1-20.

[27] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 115-122.

[28] 薛忠, 赵亮, 王凤花, 等. 基于离散元法的螺旋式排肥器性能模拟试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(5): 548-553.

[29] 袁全春, 徐丽明, 邢洁洁, 等. 机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 21-27.

[30] 宋少龙, 张东超, 汤智辉, 等. 基于离散元法的分层施肥靶参数优化与试验[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(10): 125-136.