

设施果园自动对靶精准变量施肥控制系统

白秋薇, 张 信, 罗红品, 李光林*

(西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

摘 要: 针对目前果园条施肥过程中缺乏精准变量对靶施肥装置的问题, 该研究研制了一种排肥轮槽口体积可根据果树目标施肥量及冠层直径大小自动调节, 排肥轮转速随施肥车速自动变化的果园精准变量自动对靶施肥装置与控制系统。该装置采用外槽轮式结构, 槽口体积可连续调节自动变化。采用激光雷达传感器实时探测果树冠层位置, 使用霍尔传感器检测施肥车行驶速度, 以 STM32F407VET6 单片机为核心设计了控制器。分别以尿素、复合肥、有机复合肥 3 种颗粒肥料为试验材料, 标定了不同排肥轮槽口开度在不同排肥轮转速下的排肥量, 单个槽口排肥量与排肥轮转速呈负线性关系, 决定系数 R^2 不小于 0.93; 建立了单棵果树目标施肥量与排肥轮转速、施肥车速、槽口体积以及果树冠层直径 4 个变量之间的关系及排肥轮转速控制规则。室内台架试验结果表明, 单棵柑橘树实际施肥量与给定目标施肥量相对误差最大为 5.17%, 变异系数最大为 1.47%, 可在施肥车速变化情况下准确施用不同颗粒肥料。大棚柑橘果园自动对靶施肥试验结果表明, 单棵柑橘树实际施肥量与给定目标施肥量相对误差最大为 4.83%, 变异系数最大为 6.96%, 且施肥均在果树冠层直径范围内完成。该装置能够根据果树冠层直径大小对靶按需施肥, 适应不同种类颗粒肥的少量或较大定量施肥, 满足不同大小果树不同需肥量的精准变量自动施肥要求。

关键词: 农业机械; 试验; 设计; 精准施肥装置; 自动控制; 果园

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.004

中图分类号: S224.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0028-08

白秋薇, 张信, 罗红品, 等. 设施果园自动对靶精准变量施肥控制系统[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 28-35.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.004 <http://www.tcsae.org>

Bai Qiwei, Zhang Xin, Luo Hongpin, et al. Control system for auto-targeting precision variable-rate fertilization of fruit trees in a greenhouse orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 28-35. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.004 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

土壤中的氮、磷、钾等元素与有机肥含量是影响水果品质和产量的主要因素, 合理施肥, 加强果树水肥管理是优质高产的主要措施^[1]。国内有很多果园特别是丘陵山地果园仍采用人工施肥的方式, 导致有的果树施肥不足, 有的果树施肥过量, 既浪费了人财物力, 又造成环境污染^[2]。减少化肥施用, 增施有机肥, 提高肥料利用率, 既可以改善土壤, 又能够提高果实品质^[3-5], 如何实现果园自动化精准施肥是亟需解决的问题。

为了提高肥料利用率达到按需施肥, 研究人员对不同结构形式的排肥装置及控制系统进行了研究^[6-9]。Chattha 等^[10]对蓝莓地抛撒变量施肥机喷嘴进行改进, 实现喷嘴单独控制。Przywara 等^[11-12]研究了离心盘式撒肥机结构及操作参数对肥料物理性质空间分布的影响。祝清震等^[13-14]针对小麦分层施肥播种研究了多路精准排肥播种控制系统, 排肥装置转动一圈最大排肥量为 37.05 g。

张书慧等^[15]针对田间作物开发了基于复杂可编程逻辑器件的变量施肥控制系统。刘成良等^[16-17]针对田间作物提出了一种开度转速双变量施肥播种控制序列生成方法, 在固定施肥车速的前提下进行了变量施肥试验。伟利国等^[18]设计了 2F-6-BP1 型变量配肥施肥机, 单圈最大排肥量为 73.1 g。雷小龙等^[19]设计了颗粒化水水平气送式螺旋组合可定量供肥装置, 可集中供肥满足水稻基肥施复合肥的要求; 陈雄飞等^[20]对两级螺旋排肥装置进行了设计与试验, 满足水稻基肥的施用要求。刘正道等^[21-22]对腔盘式穴施肥装置进行了研究, 单周肥腔体积大小在 14~56 cm³, 满足玉米种肥施用缓释复合肥的施肥量需求。张睿等^[23]针对农场、农垦等大面积作业地区设计了一种链条输送式宽幅变量施肥抛撒机。翟长远等^[24]针对枸杞树精量排肥设计了扇叶旋转变量施肥器, 实现了最小单位为 200 g 的变量穴施肥。现有变量施肥装置及控制系统研究大多针对大田作物, 且土地大多面积大平整, 施肥车速固定或车速变化不大的连续施肥, 外槽轮单周排肥的可控变化小, 多为双变量控制。而丘陵地区果园果树种植地地形复杂, 果树树形大小不一, 施肥过程中施肥车速匀速行驶困难, 同时若采用整条沟连续施肥, 造成肥料浪费, 降低肥料利用率。此外, 现有外槽轮式排肥结构槽口体积多数可调范围较小, 不能满足果树有机肥或专用肥施肥量较大的要求(一般每株 1.5~2.5 kg)^[25]。

针对果园果树条施肥, 本文研究了精准变量自动对靶施肥装置与控制系统。采用激光雷达传感器识别果树

收稿日期: 2021-03-06 修订日期: 2021-06-09

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (cstc2019jcsx-gksbX0001); 重庆市科委重点项目 (cstc2018jszx-cydzX0051); 中央高校基本科研业务费学生项目 (XDJK2020D017)

作者简介: 白秋薇, 博士生, 研究方向为系统检测与智能控制。

Email: baiqiwei5@126.com

*通信作者: 李光林, 教授, 博士生导师, 研究方向为传感器与智能检测。

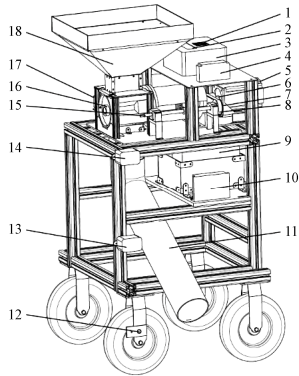
Email: liguanglein@swu.edu.cn

自动对靶，建立了单棵果树目标施肥量与排肥轮转速、施肥车速、排肥轮槽口体积及果树冠层直径 4 变量之间的关系及排肥轮转速控制规则。以柑橘果树为例，进行了室内模拟试验与大棚柑橘果园试验。

1 精准变量自动对靶施肥装置结构与工作原理

1.1 整体结构

施肥装置由排肥器和控制系统构成。排肥器由肥料箱、排肥轮、排肥管、固定架等组成；控制系统包括 STM32F407VET6 单片机、86 式步进电机、42 式步进电机、驱动器、联轴器、TF02 激光雷达传感器、霍尔传感器、4×4 矩阵键盘、LCD 液晶显示器等。施肥装置结构示意图如图 1 所示。



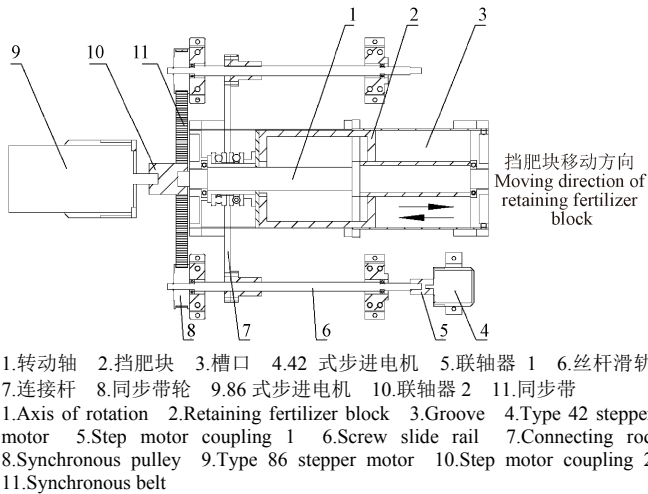
1.4×4 矩阵键盘 2.显示屏 3.控制箱 4.驱动器 1 5.86 式步进电机 6.联轴器 7.同步带轮 8.同步带 9.蓄电池 10.驱动器 2 11.排肥管 12.霍尔传感器 13.激光对靶传感器 1 14.激光对靶传感器 2 15.丝杆滑轨 16.排肥轮 17.42 式步进电机 18.肥料箱
1.4×4 matrix keyboard 2.Display screen 3.Control box 4.Driver1 5.Type 86 stepper motor 6.Shaft coupling 7.Synchronous pulley 8.Synchronous belt 9.Rechargeable battery 10.Driver 2 11.Fertilizer pipe 12.Hall sensor 13.Laser target sensor 1 14.Laser target sensor 2 15.Screw slide rail 16.Fertilizer discharging wheel 17.Type 42 stepper motor 18.Fertilizer can

图 1 自动对靶精准变量施肥装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of auto-targeting precision variable-rate fertilization device

1.2 工作原理

该施肥装置排肥器采用外槽轮式结构，其结构原理如图 2 所示，由 4 个可同时改变体积大小的槽口组成，42 式步进电机通过联轴器、丝杆滑轨、连接杆与排肥器挡肥块相连，86 式步进电机通过联轴器与排肥器主轴相连。施肥作业时，控制系统根据果树需肥量（不同果树相差较大，比如苹果树年施用量 150~360 kg/hm² (N)、90~180 kg/hm² (P₂O₅)、150~390 kg/hm² (K₂O) [26]，柑橘树年施肥量为 200~450 kg/hm² (N)、100~250 kg/hm² (P₂O₅)、150~400 kg/hm² (K₂O) [27]，土壤次施肥量为总施肥量的 15%~40% [28])、冠层直径（不同时期小乔木果树冠径一般在 1~5 m 之间）、施肥车速（果园履带车车速范围一般为 0~2 m/s [29]），自动调节排肥轮槽口体积（0~163.2 cm³）与转速（0~200 r/min，超过 200r/min 时步进电机电力矩下降），由单片机控制 42 式步进电机旋转推动挡肥块左右移动调节槽口体积，控制 86 式步进电机旋转调节排肥轮转速，由霍尔传感实时检测施肥车速，激光雷达传感器识别果树冠层，液晶显示器显示施肥车速、排肥轮转速、果树冠层位置、槽口体积及肥料种类等信息。



1.转动轴 2.挡肥块 3.槽口 4.42 式步进电机 5.联轴器 1 6.丝杆滑轨 7.连接杆 8.同步带轮 9.86 式步进电机 10.联轴器 2 11.同步带
1.Axis of rotation 2.Retaining fertilizer block 3.Groove 4.Type 42 stepper motor 5.Step motor coupling 1 6.Screw slide rail 7.Connecting rod 8.Synchronous pulley 9.Type 86 stepper motor 10.Step motor coupling 2 11.Synchronous belt

图 2 排肥器结构原理图

Fig.2 Structure diagram of fertilizer apparatus

2 装置排肥量与施肥控制模型

2.1 外槽轮体积及排肥量的验证

根据果树不同时期需肥量，选取 6 种排肥轮槽口开度进行验证，开度值分别为 108、90、72、54、36、18 mm，单个槽口体积依次为 141、117.5、94、70.5、47、23.5 cm³，将其依次命名为 V₁、V₂、V₃、V₄、V₅、V₆，分别选取密度为 0.75 g/cm³ 的尿素、0.84 g/cm³ 的复合肥、0.89 g/cm³ 的有机复合肥 3 种颗粒肥料验证排肥器排肥准确性。首先，将单个槽口体积乘以对应肥料密度得到单个槽口理论排肥量 m_i ，由单片机控制排肥轮以 5 r/min 的速度排肥得到单个槽口实际排肥量，理论排肥量与实际排肥量的统计结果如表 1 所示。从表 1 可以看出，不同槽口开度情况下单个槽口 5 r/min 时的实际排肥量与理论排肥量的相对误差均在 4.5% 以内，排肥器排肥准确，可进一步用于精准变量施肥。

表 1 排肥器槽口体积及排肥量

Table 1 Groove volume and fertilizer discharging quantity of fertilizer apparatus

肥料种类 Type of fertilizer	槽口 Groove	理论排肥量 Theoretical fertilization amount/g	实际排肥量 Actual fertilization amount/g	相对误差 Relative error/%
尿素 Urea	V ₁	105.75	103.60	2.03
	V ₂	88.13	86.87	1.42
	V ₃	70.50	69.42	1.53
	V ₄	52.88	51.81	2.01
	V ₅	35.25	34.24	2.87
	V ₆	17.63	16.86	4.34
复合肥 Compound fertilizer	V ₁	118.44	121.04	2.2
	V ₂	98.70	101.74	3.08
	V ₃	78.96	81.25	2.9
	V ₄	59.22	60.79	2.65
	V ₅	39.48	38.80	1.72
	V ₆	19.74	18.91	4.2
有机复合肥 Organic compound fertilizer	V ₁	125.49	126.13	0.51
	V ₂	104.58	106.84	2.17
	V ₃	83.66	83.00	0.79
	V ₄	62.75	62.98	0.37
	V ₅	41.83	40.59	2.96
	V ₆	20.92	19.99	4.42

2.2 排肥器不同转速下的排肥量标定

本试验分别以尿素、复合肥、有机复合肥 3 种不同颗粒的肥料为试验材料, 采用表 1 中的 6 种槽口体积进行不同转速下排肥量标定, 在室内搭建试验平台, 如图 3 所示。

分别将 3 种肥料使用排肥器的 6 种槽口体积以 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110、120、130、140 r/min 进行排肥量标定。标定时, 下料口下方放有塑料桶, 控制器内部设定排肥器排肥 2 圈(1 圈 4 个槽口), 排肥量通过电子称称取桶内肥料的质量得到, 每种肥料在每种速度下重复 3 次试验, 通过取 3 次试验的平均值得到排肥 2 圈的总排肥量 $M_{总}$ 。6 种槽口体积下, 分别对 3 种颗粒肥料在各排肥轮转速下的单个槽口实际排肥量 ($M_{总}/8$) 进行统计, 各转速下单个槽口实际排肥量如图 4 所示。

图 4 中, 相同排肥轮转速下, 排肥轮槽口体积从体积 1 到体积 6, 排肥量呈梯度减少, 可满足不同大小果树需肥量不同的情况; 在排肥轮槽口大小一定时, 随着排肥轮转速的增加, 单个槽口的排肥量降低。对单个槽口排肥量与排肥轮转速进行一元线性回归分析, 得出两者之间的一元线性回归模型为

$$m_f = an + b \tag{1}$$

式中 n 为排肥轮转动速度, r/min, m_f 为单个槽口排肥量,

g , a 、 b 分别为一元线性回归模型的系数和常量, 不同肥料、不同槽口体积下, a 、 b 的值不相同。对各回归模型进行显著性检验, 结果如表 2。

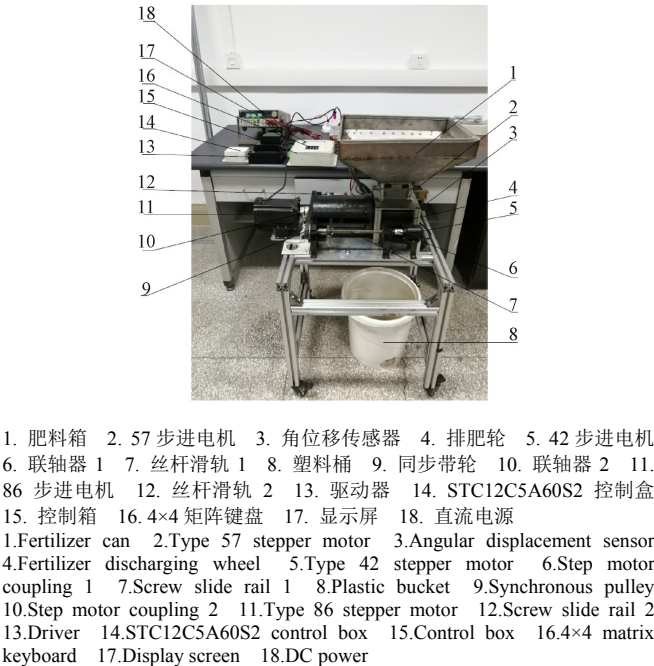


图 3 室内试验平台
Fig.3 Laboratory test platform

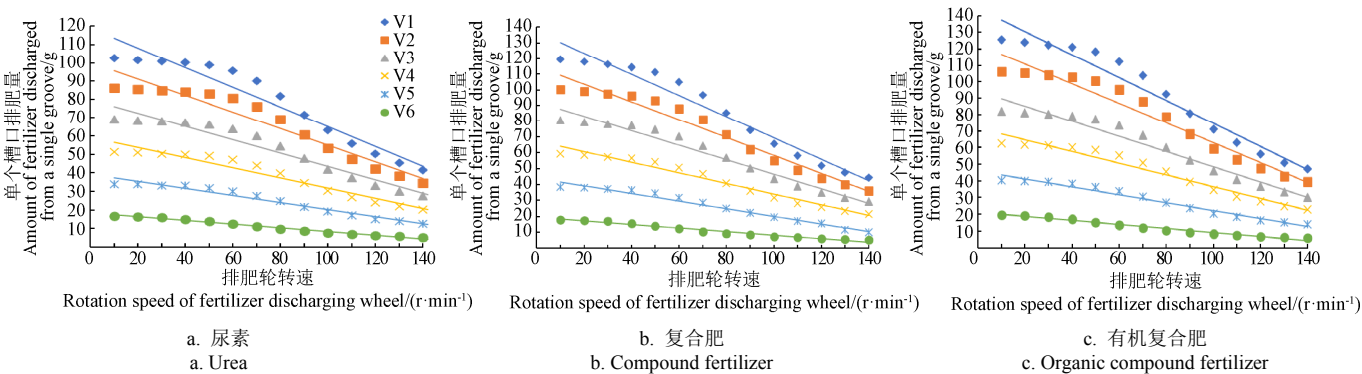


图 4 各转速下单个槽口实际排肥量

Fig.4 Actual fertilizer discharge of a single groove at each speeds

由表 2 可知, 不同颗粒肥料在各槽口体积下建立的一元线性回归模型决定系数 R^2 的值均不小于 0.93, P 值均小于 0.000 1, 则 6 种槽口体积下建立的单个槽口排肥

量与排肥轮转速之间的一元线性回归方程均特别显著且拟合度较高, 有实际意义, 置信度为 99.99%, 二者呈负线性关系。

表 2 回归结果与显著性检验

Table 2 Regression results and significance test

槽口 Groove	尿素 Urea				复合肥 Compound fertilizer				有机复合肥 Organic compound fertilizer			
	a	b	R^2	P -value	a	b	R^2	P -value	a	b	R^2	P -value
V ₁	-0.5364	118.73	0.93	2.03×10^{-8}	-0.6747	136.9	0.96	7.8×10^{-10}	-0.6975	144.39	0.95	1.98×10^{-9}
V ₂	-0.4514	100.05	0.93	2.45×10^{-8}	-0.5671	114.96	0.96	7.01×10^{-10}	-0.5959	122.65	0.95	2.45×10^{-9}
V ₃	-0.3647	79.901	0.94	1.39×10^{-8}	-0.4576	92.179	0.96	5.18×10^{-10}	-0.4596	94.427	0.96	1.92×10^{-9}
V ₄	-0.2763	59.348	0.94	7.07×10^{-9}	-0.334	67.182	0.97	1.67×10^{-10}	-0.3522	71.856	0.96	1.24×10^{-9}
V ₅	-0.1905	39.099	0.96	1.08×10^{-9}	-0.24	44.077	0.98	2.63×10^{-11}	-0.2369	45.849	0.97	9.58×10^{-11}
V ₆	-0.1005	18.402	0.98	1.56×10^{-11}	-0.1098	19.141	0.97	3.59×10^{-10}	-0.1208	21.179	0.97	9.08×10^{-11}

注: P -value 表示模型为假的概率; a 、 b 分别为一元线性回归模型的系数和常量。
Note: P -value represents the probability that the model is false. a 、 b is the coefficient and constant of linear regression model.

2.3 施肥控制模型

2.3.1 目标施肥量与各变量之间的关系

根据给定果树目标施肥量进行施肥，单棵果树目标施肥量与排肥轮转速、施肥车速、排肥轮槽口体积及果树冠层直径之间的关系为

$$m_i = 4 \cdot n \cdot m_f \cdot d_i / (60v) \quad (2)$$

式中 m_i 为单棵果树目标施肥量，g， d_i 为单棵果树冠层直径，m， n 为排肥轮转速，r/min， v 为施肥车速，m/s， m_f 为排肥轮单个槽口排肥量，g。将式 (1) 代入式 (2) 并化简得：

$$m_i = \frac{d_i}{15v} (an^2 + bn) \quad (3)$$

排肥轮槽口体积不同时，式 (3) 中 a 、 b 的值不相等。

2.3.2 排肥轮转速控制规则

在果园果树施肥过程中，施肥车匀速行驶困难。当果树确定时，冠层直径随之确定，则施肥过程车速变化时，可控制排肥轮转速随施肥车速变化，以实现果树自动精准定量施肥。可将式 (3) 转换为

$$an^2 + bn - \frac{15m_i v}{d_i} = 0 \quad (4)$$

对式 (4) 中 n 进行求解得

$$n_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - (-60am_i v / d_i)}}{2a} \quad (5)$$

$$n_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - (-60am_i v / d_i)}}{2a} \quad (6)$$

式中 a 的值均为负， b 的值均为正。分别将表 2 中 a 、 b 的值代入式 (5)、式 (6) 分析可知，式 (4) 要有实数解时， n_1 的值在 0~111 r/min 之间， n_2 的值在 87~222 r/min 之间， $n_1 \leq n_2$ ；当 m_i 或 v 为 0 时，不需要施肥， n_1 等于 0，装置不排肥，符合实际施肥情况， n_2 不等于 0，装置排肥，不符合实际施肥情况；故将式 (5) 作为排肥轮转速控制规则，导入控制系统进行排肥轮转速自动控制。

2.3.3 槽口体积自动选择规则

在排肥轮槽口体积自动调节时，首先，根据果树目标施肥量 m_i 与表 1 中单个槽口理论排肥量 m_l 进行选择， $m_i \geq m_l$ ，为避免误差较大，设定 $m_i \geq 2m_l$ 时，槽口体积可选；然后，根据式 (4) 有实数解的条件：

$$b^2 - (-60am_i v / d_i) \geq 0 \quad (7)$$

则

$$v \leq \frac{b^2 \times d_i}{60|a|m_i} \quad (8)$$

将满足 $m_i \geq 2m_l$ 时的槽口体积对应 a 、 b 的值依次代入式 (8)，计算出相应体积下 v_{\max} 的值，从 V1~V6 分别记为 $v_{\max1} \sim v_{\max6}$ ；依次将 $v_{\max6} \sim v_{\max1}$ 与施肥车最大行驶速度进行比较，当 v_{\max} 大于等于施肥车最大行驶速度选出排肥轮槽口体积，施肥车最大行驶速度根据施肥现场总体果树目标施肥量及冠层直径确定。

3 控制系统设计

该施肥装置控制系统以 STM32F407VET6 型单片机为核心，根据建立的施肥控制模型，采用 C 语言编写果树自动对靶变量施肥控制程序，其主要流程如图 5 所示。系统上电复位后，通过 4×4 矩阵键盘选择肥料种类、输入目标施肥量与果树冠层直径，控制芯片 STM32F407VET6 根据槽口体积自动选择规则，产生可调占空比脉冲波形 PWM 波控制 42 式步进电机推动排肥器挡肥块左右移动调节槽口体积，霍尔传感器实时检测施肥车速，当激光雷达传感器测定距离值小于设定值时（设定值根据激光雷达传感器与果树最远端及果树后方障碍物之间的距离确定），识别到果树冠层，控制芯片根据式 (5) 快速计算排肥轮所需转速，并产生相应频率的 PWM 波控制 86 式步进电机旋转，带动排肥轮转动施肥，当激光雷达传感器测定距离值不小于设定值时，未识别到果树冠层，86 式步进电机停止转动，不施肥。

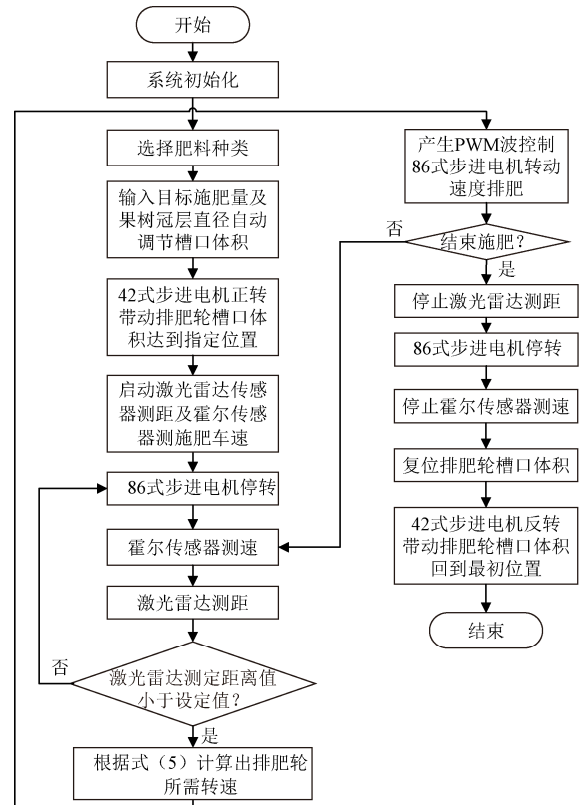


图 5 果树自动对靶变量施肥控制流程图

Fig.5 Flow chart of auto-targeting precision variable-rate fertilization control for fruit trees

4 室内及果园试验

为了测试装置与控制系统可调施肥量范围是否满足果树不同时期对不同种类颗粒肥的施肥量需求，以及验证自动对靶变量施肥的准确性与稳定性，以柑橘果树为例，分别进行室内模拟变量施肥试验与果园自动对靶变量施肥试验。

4.1 试验条件

中国柑橘大部分种植在丘陵或山地，种植园栽种株

距一般为 3~5 m, 行距为 3.5~6 m^[30], 优质丰产园成年柑橘树高度在 3 m 以下, 绿叶层厚度 1~1.5 m, 树冠覆盖率 70%~80%, 树冠间距在 0.2~1 m^[31], 常采用有机肥结合化肥的施肥方式, 全年进行多次施肥, 且常根据幼树少施、大树多施因树施肥。室内模拟变量施肥试验以种植株行距为 3 m×4 m、冠层直径为 2.5 m 左右的成年柑橘果园为例。果园自动对靶变量施肥试验在种植株行距为 3 m×4 m、冠层直径为 1 m 左右的幼年柑橘果园进行。

4.2 试验方法

4.2.1 室内模拟变量施肥试验

室内模拟变量施肥试验如图 3。采用 STC12C5A60S2 型单片机控制 57 步步进电机转动模拟施肥车行驶速度变化, 结合运行时间, 在模拟施肥距离等于果树冠层直径时, 停止转动。模拟施肥时, 通过输入目标施肥量及果树冠层直径自动调节排肥轮槽口体积, 由角位移传感器测定模拟施肥车行驶速度, 控制芯片 STM32F407VET6 根据式 (5) 快速计算排肥轮所需转速, 产生 PWM 波控制 86 步进电机转动速度, 实现排肥轮转速控制。

根据种植株行距 3 m×4 m 的成年柑橘果园, 设定柑橘果树冠层直径分别为 2、2.5、3 m, 每公顷可种植 833 棵树, 所选尿素含 N 率为 46.2%, 复合肥含 N、P₂O₅、K₂O 率分别为 15%, 单棵果树土壤次施肥量为 78~800 g^[28-29], 结合每株果树有机肥施用量 1.5~2.5 kg^[25], 设定单棵果树目标施肥量分别为颗粒尿素 50、100、200、300、400 g, 颗粒复合肥 500、600、700、800、900 g, 颗粒有机复合肥 1,500、1,800、2,000、2,200、2,500 g, 依次进行施肥试验。根据果树冠层直径及目标施肥量, 控制模拟施肥车最大行驶速度分别为 2、1、0.5 m/s。同一目标施肥量重复 3 次试验, 通过电子秤称取施肥后的肥料质量得到实际施肥量, 并计算出 3 次试验的平均值与施肥量变异系数。

4.2.2 果园自动对靶变量施肥试验

将施肥装置搭载在手扶式履带车上, 在西南大学大棚柑橘园进行自动对靶变量施肥试验, 如图 6 所示。根据大树多施、幼树少施的原则, 使用研制的施肥装置与控制系统分别对 9 棵不同的柑橘树施颗粒尿素 20、50、80 g, 复合肥 150、180、200 g, 有机复合肥 400、500、600 g, 记为 $m_1\sim m_9$, 对应冠层直径分别为 0.8、0.9、1.0、0.9、0.8、1.0、0.9、1.0、1.2 m, 记为 $d_1\sim d_9$ 。果园试验过程中, 根据果树目标施肥量及冠层直径, 人为操作施肥车速在 0~1 m/s 之间变化, 采用霍尔传感器实时检测施肥车行驶速度, 由激光雷达传感器自动识别柑橘树冠层对靶施肥, 同一目标施肥量重复试验 3 次, 将袋子铺在果树冠层下方, 称取袋子上的肥料质量得到实际施肥量, 并计算出 3 次试验的平均值与施肥量变异系数; 对施肥后落肥起点、终点与果树对应冠层边缘的距离进行测量, 将 3 次试验的平均值分别记为起点偏移距离、终点偏移距离, 超出果树冠层边缘为正, 反之为负。



图 6 果园自动对靶变量施肥试验

Fig.6 Auto-targeting variable-rate fertilization test in orchard

4.3 试验结果与分析

室内模拟变量施肥试验结果如表 3; 果园自动对靶变量施肥试验结果如表 4。

表 3 室内模拟变量施肥试验结果

Table3 Results of indoor simulated variable-rate fertilization test

肥料种类 Type of fertilizer	施肥车速范围 Speed range of fertilizing vehicle/m.s ⁻¹	果树冠层直径 Canopy diameter of fruit tree/m	目标施肥量 Target amount of fertilizer/g	槽口 Groove	实际施肥量平均值 Average value of actual fertilizer amount/g	相对误差 Relative error/%	变异系数 Coefficient of variation/%
尿素 Urea	0~2	2.5	50	V ₆	52.4	4.87	0.58
		2	100	V ₅	100.3	0.30	1.31
		3	200	V ₅	192.9	3.53	0.83
		2.5	300	V ₄	295.0	1.67	0.03
		3	400	V ₃	388.6	2.85	0.54
复合肥 Compound fertilizer	0~1	2	500	V ₃	525.8	5.17	0.67
		2.5	600	V ₃	592.6	1.24	0.59
		3	700	V ₂	676.6	3.35	0.36
		2	800	V ₂	774.7	3.16	0.34
		2.5	900	V ₁	910.8	1.20	1.21
有机复合肥 Organic compound fertilizer	0~0.5	2	1500	V ₁	1479.7	1.35	0.35
		2.5	1800	V ₁	1846.6	2.59	0.26
		2	2000	V ₁	2025.8	1.29	1.47
		2.5	2200	V ₁	2250.9	2.31	0.12
		3	2500	V ₁	2542.7	1.71	0.10

表 3 中室内模拟试验结果表明, 单棵柑橘树施用尿素的实际施肥量与目标施肥量最大相对误差为 4.87%,

复合肥施用量最大相对误差为 5.17%, 有机复合肥施用量最大相对误差为 2.59%, 施肥量变异系数最大值为

1.47%，可在单棵果树目标施肥量为 50~2 500 g 范围内准确施肥。表 4 中果园自动对靶变量施肥试验结果表明，单棵柑橘树尿素施用量最大相对误差为 4.83%，复合肥施用量最大相对误差为 2.87%，有机复合肥施用量

最大相对误差为 3.78%；施肥量变异系数最大值为 6.96%；落肥起点偏移冠层边缘距离最大为-0.15 m，终点偏移冠层边缘距离最大为-0.09 m，落肥位置均在果树冠层直径范围内。

表 4 果园自动对靶变量施肥试验结果
Table 4 Results of auto-targeting variable-rate fertilization test in orchard

肥料种类 Type of fertilizer	施肥车速范围 Speed range of fertilizing vehicle/(m·s ⁻¹)	果树冠层直径 Canopy diameter of fruit tree/m	目标施肥量 Target amount of fertilizer/g	槽口 Groove	起点偏移距离 Starting point offset distance/m	终点偏移距离 End point offset distance/m	实际施肥量平均值 Average value of actual fertilizer amount/g	相对误差 Relative error/%	变异系数 Coefficient of variation/%
尿素 Urea	0~1	0.8	20	V ₆	-0.15	-0.09	20.4	2.17	6.96
		0.9	50	V ₆	-0.11	-0.05	47.9	4.20	2.01
		1.0	80	V ₅	-0.06	-0.04	76.1	4.83	2.21
复合肥 Compound fertilizer	0~1	0.9	150	V ₄	-0.12	-0.07	153.4	2.29	1.29
		0.8	180	V ₄	-0.08	-0.03	185.2	2.87	1.17
		1.0	200	V ₄	-0.05	-0.06	196.4	1.82	2.40
有机复合肥 Organic compound fertilizer	0~1	0.9	400	V ₁	-0.10	-0.08	402.9	0.72	3.23
		1.0	500	V ₁	-0.07	-0.07	490.6	1.88	3.73
		1.2	600	V ₁	-0.04	-0.05	622.7	3.78	1.75

果园试验单棵柑橘树施肥量变异系数总体高于室内模拟试验，其主要原因是该施肥装置当施肥车运动特别是行驶震动时，排肥轮转速不十分稳定所致。但根据柑橘树目标施肥量、冠层直径及施肥车速自动调节排肥轮槽口体积与转速，单棵柑橘树施肥量相对误差均小于 5.5%，最大变异系数为 6.96%；采用激光雷达传感器识别果树冠层对靶施肥，落肥位置均在果树冠层直径范围内。则该施肥装置与控制系统实现了不同大小果树对不同颗粒肥料的精准变量自动对靶施肥，既满足尿素的少量精准施肥需求，又满足较大量有机颗粒肥的定量施肥需求。

此外，本装置与控制系统的果园验证试验在大棚柑橘果园进行，柑橘树较少，后期在进行丘陵山地果园大面积连续对靶自动施肥时，不仅要加装定位系统，还需根据每棵果树空间位置、需肥量及冠层直径信息生成施肥处方图，导入控制系统，以实现大面积果树自动对靶按需施肥。本装置以尿素、复合肥、有机复合肥 3 种颗粒肥料为试验材料进行了试验，对粉状肥料的适应性需进一步试验分析。

5 结 论

- 1) 根据果园果树大小不一、需肥量不同及施肥车速无法保持匀速，建立了单棵果树目标施肥量与排肥轮转速、施肥车速、排肥轮槽口体积及果树冠层直径之间的关系及排肥轮转速控制规则。
- 2) 室内模拟试验表明，施颗粒尿素时，单棵果树施肥最大相对误差为 4.87%；施复合肥时单棵果树最大相对误差为 5.17%；施有机复合肥单棵果树最大相对误差为 2.59%。
- 3) 果园试验表明，激光雷达传感器可对不同大小柑橘果树冠层准确识别，有效施肥在果树冠层直径对应的土层范围内；单棵柑橘树施肥量最大相对误差为 4.83%，变异系数最大为 6.96%，满足不同大小果树精准变量自动对靶施肥的要求。

[参 考 文 献]

[1] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 1-19.
Tang Han, Wang Jinwu, Xu Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1-19. (in Chinese with English abstract)

[2] 尚杰, 尹晓宇. 中国化肥面源污染现状及其减量化研究[J]. 生态经济, 2016, 32(5): 196-199.
Shang Jie, Yin Xiaoyu. Study on the present situation and reduction of fertilizer non-point source pollution of China[J]. Ecological Economy, 2016, 32(5): 196-199. (in Chinese with English abstract)

[3] 肖阳. 农业绿色发展背景下我国化肥减量增效研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
Xiao Yang. Reduction and Efficiency of Chemical Fertilizer Under the Background of Agricultural Green Development in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese with English abstract)

[4] 佚名, 全国农业可持续发展规划[J]. 中国农业信息, 2016, 23: 26-33.

[5] 宋月鹏, 张紫涵, 范国强, 等. 我国果园开沟施肥机械研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3): 7-12, 25.
Song Yuepeng, Zhang Zihan, Fan Guoqiang, et al. Current status and countermeasure research for cotton-stalk mechanical harvesting in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3): 7-12, 25. (in Chinese with English abstract)

[6] 顿国强, 陈海涛, 冯夷宁, 等. 基于 EDEM 软件的肥料调配置置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 36-42.
Dun Guoqiang, Chen Haitao, Feng Yining, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software[J]. Transactions of the

- Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(7): 36-42. (in Chinese with English abstract)
- [7] 安晓飞, 付卫强, 王培, 等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 103-108. An Xiaofei, Fu Weiqiang, Wang Pei, et al. Development of variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 103-108. (in Chinese with English abstract)
- [8] Kim T H. Analysis on fertilizer application uniformity of centrifugal fertilizer distributor[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2018, 43(4): 420-425.
- [9] Gomez-Gil J, De-Lozar-Escudero A, Navas-Gracia L M, et al. Analytical estimation of optimal operation variables of a centrifugal fertilizer distributor, using the gradient method on multiple seeds[J]. Agrobiencia, 2009, 43(5): 497-509.
- [10] Chattha H S, Zaman Q U, Chang Y K, et al. Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 70-78.
- [11] Przywara A. The impact of structural and operational parameters of the centrifugal disc spreader on the spatial distribution of fertilizer[J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2015, 7: 215-222.
- [12] Abbou E M, Piron E, Chateaneuf A, et al. On-the-field simulation of fertilizer spreading: Part 3 – Control of disk inclination for uniform application on undulating fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 150-158.
- [13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(18): 12-20. (in Chinese with English abstract)
- [14] 祝清震, 武广伟, 罗长海, 等. 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 155-163. Zhu Qingzhen, Wu Guangwei, Luo Changhai, et al. Design of multipath precision fertilizer and sowing control system based on attitude real time monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 155-163. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张书慧, 齐江涛, 廖宗建, 等. 基于 CPLD 的变量施肥控制系统开发与应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 200-204. Zhang Shuhui, Qi Jiangtao, Liao Zongjian, et al. Research and application of control system for variable rate fertilizer applicator based on CPLD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 200-204. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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(S1): 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(S1): 233-238. (in Chinese with English abstract)
- [17] 古玉雪, 苑进, 刘成良. 基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 134-139. Gu Yuxue, Yuan Jin, Liu Chengliang. FIS-based method to generate bivariate control parameters regulation sequence for fertilization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 134-139. (in Chinese with English abstract)
- [18] 伟利国, 张小超, 苑严伟, 等. 2F-6-BP1 型变量配肥施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 14-18. Wei Ligu, Zhang Xiaochao, Yuan Yanwei, et al. Design and experiment of 2F-6-BP1 variable rate assorted fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 14-18. (in Chinese with English abstract)
- [19] 雷小龙, 李蒙良, 张黎骅, 等. 颗粒化肥水平气送式螺旋组合可调定量供肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 9-18. Lei Xiaolong, Li Mengliang, Zhang Lihua, et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 9-18. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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. Chen Xiongfei, Luo Xiwen, Wang Zaiman, et al. Design and experiment of fertilizer distribution apparatus with double-level screws[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 10-16. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘正道, 王庆杰, 刘春鸽, 等. 腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 137-144, 355. Liu Zhengdao, Wang Qingjie, Liu Chungge, et al. Design and experiment of precision hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 137-144, 355. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘正道, 王庆杰, 李洪文, 等. 腔盘式穴施肥装置柔性护肥机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 97-103. Liu Zhengdao, Wang Qingjie, Li Hongwen, et al. Design of flexible fertilizer protection mechanism for hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 97-103. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张睿, 王秀, 赵春江, 等. 链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 20-25.

- Zhang Rui, Wang Xiu, Zhao Chunjiang, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer spreader with conveyor chain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 20-25. (in Chinese with English abstract)
- [24] 翟长远, 杨硕, 张波, 等. 支持故障报警的果园对靶变量排肥系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 16-23.
- Zhai Changyuan, Yang Shuo, Zhang Bo, et al. Orchard toward-target variable-rate fertilizer system supporting fault alarming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 16-23. (in Chinese with English abstract)
- [25] 苏子昊, 兰峰, 黎子明, 等. 国内外果园开沟施肥机械现状分析[J]. 农业机械, 2014, 15: 134-137.
- [26] 魏绍冲, 姜远茂. 山东省苹果园肥料施用现状调查分析[J]. 山东农业科学, 2012, 44(2): 77-79.
- Wei Shaochong, Jiang Yuanmao. Investigation on fertilization status in apple orchards of Shandong province[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44(2): 77-79.
- [27] 雷靖, 梁珊珊, 谭启玲, 等. 我国柑橘氮磷钾肥用量及减施潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1504-1513.
- Lei Jing, Liang Shanshan, Tan Qiling, et al. NPK fertilization rates and reducing potential in the main citrus producing regions of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(9): 1504-1513. (in Chinese with English abstract)
- [28] 淳长品. 柑橘高产优质栽培与病虫害防治图解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 97-99.
- [29] 李冲冲. 丘陵果园多功能履带运输车的设计与试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- Li Chongchong. Design and Tests of the Multifunctional Track Transporter for Hilly Orchards[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [30] 谢深喜, 卢晓鹏. 柑橘现代栽培技术[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2014: 75-76, 91.
- [31] 徐建国. 柑橘生产配套技术手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 101-105.

Control system for auto-targeting precision variable-rate fertilization of fruit trees in a greenhouse orchard

Bai Qiuwei, Zhang Xin, Luo Hongpin, Li Guanglin^{*}

(College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Over or under-fertilization has normally resulted in environmental pollution or the reduction of fruit production, particularly in orchards. In this study, a precise target fertilization device with variable rates was developed for fruit trees in an orchard. The volume of the groove was automatically adjusted for the fertilizer discharging wheel, according to the diameter of the canopy of fruit trees, and the amount of fertilizer required by the target. The rotation speed of the fertilizer discharging wheel was continuously altered with the speed of the vehicle in the process of fertilization. The external groove wheel structure was adopted in the device to tailor the groove volume. A Lidar sensor was used to detect the canopy position of fruit trees in real time, thereby determining the starting and stopping position of fertilization. A hall sensor was used to detect the speed of the fertilization vehicle, and STM32F407VET6 microcontroller was used as the core to design the controller. Three kinds of granular fertilizers were selected as test materials, including urea, compound fertilizer, and organic compound fertilizer. The amount of fertilizer discharging was also calibrated under various speeds of fertilizer discharging wheels with different groove openings. The fertilizer discharging quantity of a single groove showed a negative linear relationship between the rotation speed of fertilizer discharging wheel, and the determination coefficient R^2 was greater than or equal to 0.93. Some mathematical relationships were established between the target fertilizer amount of a single fruit tree and the rotation speed of fertilizer discharging wheel, the speed of fertilization vehicle, the volume of the groove of fertilizer discharging wheel, and the diameter of the canopy of the fruit tree. The control rules of rotation speed were also established for the fertilizer discharging wheel. An experiment of variable fertilization was performed on the citrus trees in a greenhouse, when the target fertilization amount of a single fruit tree was changed from 50 to 2 500 g. The results showed that the relative error of the maximum fertilization was 5.17% in a single fruit tree. Moreover, the average relative error was less than 3%, and the maximum coefficient of variation was 1.47%. Furthermore, the different granular fertilizers were accurately applied under the changing speed of the fertilization vehicle. The relative error of the maximum fertilization was 4.83% in a single citrus tree, the average relative error was less than 4.5%, and the maximum coefficient of variation was 6.96%, and the automatic fertilization was completed within the diameter of the canopy of the fruit tree. Consequently, the device can be expected to apply the fertilizer on the specific target, according to the diameter of the fruit tree canopy, suitable for a small or large amount of quantitative fertilization for the different kinds of granular fertilizer. Precise variable fertilization can contribute to different sizes of fruit trees.

Keywords: agricultural machinery; experiment; design; precision fertilization device; automatic control; orchard