

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.021

# 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究

祝清震<sup>1,2</sup> 武广伟<sup>1</sup> 罗长海<sup>1</sup> 魏学礼<sup>1</sup> 王晓鸥<sup>3</sup> 孟志军<sup>1</sup>

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

3. 黑龙江省农垦总局科技信息中心, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 针对现有精准排肥播种控制系统缺少对机具姿态进行监测判别现状,在现有精准排肥播种控制系统架构基础上,增加了机具作业姿态实时监测模块,使系统可以根据机具的实时前进速度和作业姿态自动控制排肥量和播种量,减少人员对系统的操作。该系统主要由车载控制终端、PID 控制器、多路集成比例阀、光电转速测试码盘、机具姿态解析模块、机具位置与速度解析模块、液压马达等组成,其中机具姿态解析模块采用 MPU6050 芯片实时测量下拉杆与机架的俯仰角,应用 STM32F103MCU 芯片实时获取 MPU6050 芯片的输出数据,并反馈到车载控制终端,封装后的机具姿态解析模块安装在拖拉机三点悬挂的下拉杆中部,对下拉杆与水平面的夹角数据进行实时记录和反馈,判别机具的作业姿态是否处于工作状态。将该控制系统安装在小麦基肥精准分层施肥播种机上,在北京市昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地,对该控制系统进行静态标定和动态试验,以检测可靠性和稳定性。静态标定试验结果显示,马达转速与系统的排肥排种量存在一元线性关系,此时浅层肥料、深层肥料和种子的单圈排量分别为 16.97、29.31、11.2 g;姿态标定结果表明,设置临界角为 5.3°时,系统的机具姿态提示信息正确,能够满足姿态监测的要求;动态试验表明,机具工作状态下,浅层肥料、深层肥料和种子排量变异系数分别为 3.5%、3.8% 和 3%,3 路的排量偏差都控制在 5% 以内,机具抬升状态下,排肥排种轴处于静止状态,说明该系统的运行过程总体比较稳定,能够满足小麦基肥精准分层施肥播种机具的精准排肥排种的作业要求,同时能够减少人为操作流程。

**关键词:** 排肥;播种;姿态监测;精准控制;系统设计

中图分类号: S24; S223.2<sup>+</sup>4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)S0-0155-09

## Design of Multipath Precision Fertilizer and Sowing Control System Based on Attitude Real Time Monitoring

ZHU Qingzhen<sup>1,2</sup> WU Guangwei<sup>1</sup> LUO Changhai<sup>1</sup> WEI Xueli<sup>1</sup> WANG Xiaou<sup>3</sup> MENG Zhijun<sup>1</sup>

(1. Beijing Agricultural Information Technology Research Center, Beijing 100097, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&amp;F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Science and Technology Information Center, General Administration of Agriculture and Reclamation of Heilongjiang, Harbin 150030, China)

**Abstract:** Winter wheat is the most important crop in Huang-Huai-Hai (HHH) zone of China. Fertilization is an important process of wheat production, which directly affects the yield of crops, reasonable and effective use of chemical fertilizer can improve the yield of crops. At present, the automation level of wheat sowing and fertilization is very low in China, most of the sowing and fertilization machines are driven by ground wheels, the amount of sowing and fertilizer cannot be controlled accurately which caused the uneven distribution. In order to reduce the amount of fertilizer and improve the work quality in wheat production, agronomic method and precision control technology must be used to improve the performance of the sowing and fertilization machines. The method of stratified fertilization and sowing is an ideal agronomic method of winter wheat production in HHH zone of China. A control system of multipath precision fertilizer and sowing was designed based on attitude real time monitoring. The precision control system was designed to achieve the requirements of the precision operation. The angle

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600、2016YFD0200601)

作者简介: 祝清震(1989—),男,博士生,主要从事小麦基肥精准施用与装备研究,E-mail: zhenforyou@163.com

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

sensor was installed in the middle of lower link of tractor, which was used to judge the working attitude of machine. Its working principle was hydraulic motor driven sowing and fertilization, the amount was adjusted according to the change of the machine's speed obtained by GPS. The amount of the seed, the shallow fertilizer and the deep fertilizer can be controlled independently. The sowing and fertilization working performance of the control system was tested in static and dynamic condition. The coefficient of variation of seed, the shallow fertilizer and the deep fertilizer was within 3%, 3.5% and 3.8% at speed of 5 km/h and target displacement of 225 kg/hm<sup>2</sup>, 150 kg/hm<sup>2</sup> and 300 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The result showed that the amount of sowing and fertilization consistency was good and relatively constant, variation coefficient of each row was small at the same speed, which can meet the requirement of the actual production.

**Key words:** fertilization; sowing; attitude monitoring; precision control; system design

## 0 引言

冬小麦是我国主要粮食作物,2016年统计数据显示,我国小麦种植面积达到2414.1万hm<sup>2</sup>,总产量达到1.3亿t,分别约占全国粮食作物种植总面积的21.3%和全国粮食总产量的20.9%。保证小麦产量的稳定持续增长,对维护我国粮食安全具有重大意义<sup>[1-2]</sup>。冬小麦的播种和基肥施用是小麦生产作业管理过程中一个重要环节,已有研究表明,冬小麦种子精播和化肥精准施用对提高小麦产量和肥料的利用率,以及减少化肥的施用量具有重要意义<sup>[3]</sup>。

现有冬小麦播种施肥机具的排肥、排种过程主要通过地轮驱动完成,由于地轮在滚动过程中存在一定的滑移,使机具的实际排肥、排种量与目标排量存在一定的误差,进而影响机具的施肥播种作业精度<sup>[4-5]</sup>。为了提高冬小麦的播种精度和肥料的精准施用效果,科研人员对机具的精密排肥播种控制系统进行了大量研究<sup>[6-7]</sup>,左兴健等<sup>[8]</sup>、TOLA等<sup>[9]</sup>开发了基于作业机具实时速度的精准排肥控制系统,孟志军等<sup>[10-12]</sup>设计了基于处方图的精准变量施肥控制系统,汪小岳等<sup>[13]</sup>结合近地光谱技术,设计了冬小麦实时变量追肥控制系统,苑进等<sup>[14]</sup>、SU等<sup>[15]</sup>对精密排肥的控制算法进行优化研究。以上研究都是根据机具的实时行驶速度改变外槽轮排肥播种器的转速或外槽轮的有效工作长度,以达到精密排肥排种的目的。但在实际精准施肥播种作业过程中,缺少对机具姿态的监测,当拖拉机在田间掉头时,机具虽然被抬起,基于实时速度的排肥播种控制系统仍然会持续进行排肥播种作业,造成了种子和肥料的浪费。

联合作业机具在实际应用中越来越广泛<sup>[16-17]</sup>,如祝清震等<sup>[18-19]</sup>设计了可以一次完成旋耕、分层施肥和整地的联合作业机具,付乾坤等<sup>[20]</sup>设计了玉米灭茬起垄施肥播种联合作业装备,张军昌等<sup>[21]</sup>设计

了秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机,联合作业可以减少拖拉机的进地次数,提高农田管理效率,这也对配合施肥播种联合作业机具的精准控制系统提出了更高的要求。这里的多路精准施肥播种控制系统并非传统单路精准控制系统的简单叠加,关于多路精准排肥播种控制系统的研究还相对较少。在本研究团队前期研究的基础上<sup>[22-24]</sup>,开发较为完善的精准播种和施肥控制系统非常必要。

针对以上问题,在现有精准排肥播种控制系统架构的基础上,本文设计一种基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统,并将该控制系统应用于本团队设计的小麦基肥精准分层施肥播种机上,控制系统采用角度传感器实时监测机具的抬升角参数,使精准排肥播种控制系统可以根据机具的位置信息、前进速度和机具姿态对排肥排种轴的转速进行实时调节,以降低操作人员对系统的干扰,进而提高整个系统播种和施肥的自动化控制程度。

## 1 系统整体设计与工作原理

### 1.1 系统整体设计

基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统是配合本研究团队前期设计的小麦基肥精准分层施肥播种机<sup>[18-19]</sup>应用需求而开发的,该机具可以一次完成肥料的分层施用和小麦的宽幅撒播作业,基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统能够提高该机具的精准作业效果,主要由车载控制终端、PID控制器、多路集成比例阀、光电转速测试码盘、机具姿态解析模块、深层肥驱动液压马达、浅层肥驱动液压马达、排种驱动液压马达、机具位置与速度解析模块、蓄电池、液压油缸等组成,系统的总体架构如图1所示,蓝色连接线表示电源线和CAN总线,绿色连接线表示液压油路,控制系统能够对机组的作业姿态、位置信息、前进速度和马达转速进行监测,对深层肥、浅层肥和小麦种子进行实时精准的闭环控制,系统的液压油源来自拖拉机的液压油缸,拖

拉机的蓄电池为整个系统提供电能,各控制模块与车载控制终端之间的数据通过 CAN 总线传输。

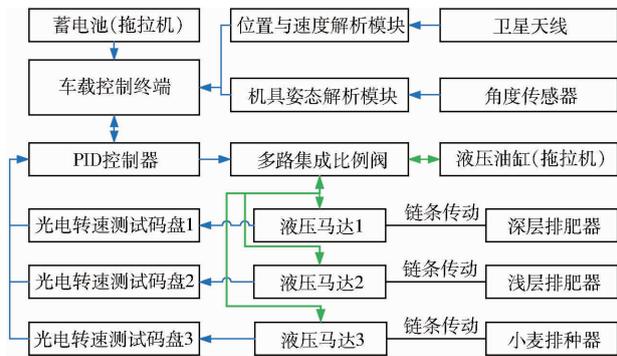


图1 控制系统总体架构

Fig.1 Overall structure of control system

## 1.2 工作原理

在系统运行前,对车载控制终端的软件操作界面输入设备参数、肥料目标施用量、小麦目标播种量等信息,并建立控制终端软件与天线、角度传感器、PID控制器的连接关系。控制系统的主程序通过获取机具的空间位置信息,进行解析机具的前进速度,通过获取角度传感器的数据信息,进行判别机具是否处于工作姿态,然后结合前期输入的设备参数、肥料目标施用量和小麦目标播种量信息,车载控制终端计算深层肥、浅层肥排肥器和小麦排种器的排量和播量,并将该数据通过 CAN 总线传递给 PID 控制器,其中 PID 控制器通过控制多路集成比例阀的液压油流速,达到控制液压马达转速的目的,并通过光电转速测试码盘对液压马达的转速进行实时监测,将实际的液压马达的转速信号反馈到 PID 控制器,对液压马达的转速进行校正和微调,以提高排肥排种量的精度,构成一个闭环的控制系统,精准排肥播种控制系统的流程如图 2 所示。

## 2 系统硬件设计和选型

### 2.1 车载控制终端

车载控制终端是精准排肥播种控制系统的核心硬件,主要进行控制和协调各模块的稳定运行,根据系统的工作原理可知,车载控制终端的任务主要包括配置机具的物理参数,深层和浅层的目标施肥量,小麦的目标播种量,采集处理机具的定位信息,采集处理机具的作业姿态信息,通过 CAN 总线对 PID 控制器进行通信和发送指令,并接收来自 PID 控制器的反馈信息。为了满足和实现以上工作要求,本系统采用预装 Windows XP Embedded 操作系统的 VMC1000 车载控制终端(NEXCOM 公司),如图 3 所示,该车载控制终端配备 7 寸液晶显示屏和多种数据接口,在室外和移动环境下工作性能稳定,能够

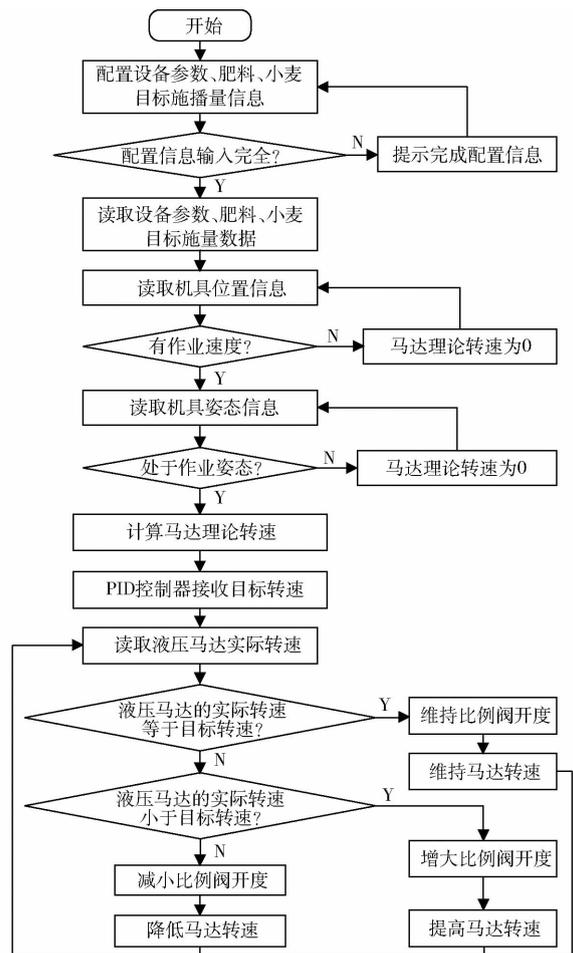


图2 控制系统流程图

Fig.2 Flow chart of control system



图3 VMC1000 车载控制终端

Fig.3 VMC1000 vehicle control terminal

满足复杂农田环境下的信息处理和运算需求,并提供 eMbeddedVisualC++ 集成开发环境<sup>[8]</sup>,为后期精准排肥播种控制系统的交互运行提供良好平台。

### 2.2 作业状态信息采集模块

作业状态信息采集模块主要采集机具位置信息、作业速度信息和机具姿态信息。其中位置信息主要用于机具位置和处方图的对比分析,以获得机具当前位置的目标施肥量;作业速度信息主要用于计算深层肥、浅层肥和小麦种子的目标施播量;姿态信息主要用于判别机具的工作状态,设计作业状态信息采集模块对于提高系统的控制精度至关重要。其中机具的位置信息和作业速度信息通过 GPS 定位模块获取,机具的姿态信息通过角度传感器获取。

### 2.2.1 机具位置与速度解析模块

NV08C Mini PCI-E 模块是目前广泛应用的全球卫星系统接收器模块,能够兼容 GPS、GNSS、GLONASS、GALILEO 等<sup>[25]</sup>,鉴于选用的车载控制终端 VMC1000 拥有 Mini PCI-E 数据扩展接口,同时为了提高控制系统的集成度,这里选用 NV08C Mini PCI-E 模块对机具的位置和作业速度信息进行采集,其主要性能指标如表 1 所示。由表 1 可知, NV08C Mini PCI-E 模块能够满足复杂农田作业环境下精准排肥播种控制系统定位的功能需求。将 NV08C Mini PCI-E 模块作为嵌入式 Mini PCI Express GPS 接收器,直接嵌入到车载控制终端上,采用 GPS 数据协议输出机具的定位数据,设置输出频率为 10 Hz。

表 1 NV08C Mini PCI-E 模块主要性能指标

Tab.1 Main performance indicators of NV08C Mini PCI-E module

性能参数	指标
首次定位时间/s	3(热启动) 5(冷启动) <1(重捕获)
灵敏度/dB	-160(捕获) -143(跟踪)
作业精度/m	<1.5(水平) <2.0(垂直)
数据更新频率/Hz	1、2、5、10
协议	NMEA 0183 IEC 61162-1
数据接口	USB 硬件 PCI-Express 标准接口 虚拟 COM 端口设备
串口波特率/(b·s <sup>-1</sup> )	4 800 ~ 230 400
工作温度范围/℃	-40 ~ 85

### 2.2.2 机具作业姿态解析模块

相较于传统的精准排肥播种控制系统架构,本文增加了机具作业姿态监测模块,以提高控制系统的自动化程度。小麦基肥精准分层施肥播种机在拖拉机的三点悬挂机构的挂接和牵引下,进行田间施肥播种作业,其中三点悬挂机构的下拉杆前端与拖拉机的下悬挂点一侧铰接,另一端与播种施肥机具铰接;上拉杆前端与拖拉机的上悬挂点铰接,另一端与播种施肥机具的上挂销点铰接,如图 4 所示。悬挂机构的上拉杆和下拉杆都可以看做刚性杆结构,当机具的作业姿态发生变化时,机具相对于拖拉机的空间位置也会随之变化,这里分别表现在上拉杆 AC、下拉杆 BD 相对于水平面角度的变化,因此在下拉杆 BD 上安装俯仰角传感器可以进行机具作业姿

态的判别<sup>[26]</sup>。

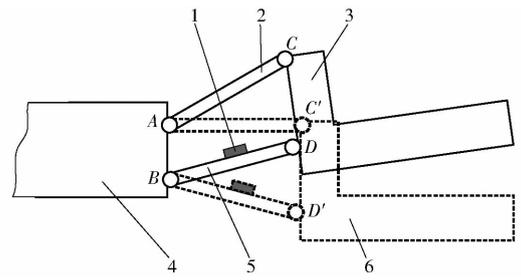


图 4 机具姿态判别方法

Fig.4 Attitude discrimination method of machine tool

1. 俯仰角传感器
2. 上拉杆
3. 抬升状态机具
4. 拖拉机
5. 下拉杆
6. 作业状态机具

选用 MPU6050 姿态监测模块实时测量下拉杆 BD 的俯仰角,应用 STM32F103 型单片机实时获取 MPU6050 姿态监测模块的输出数据,并通过 RS232 接口上传到车载控制终端,最终得到下拉杆 BD 和水平地面的夹角,作业姿态传感器的硬件架构和封装样式如图 5 所示。控制系统在运行前,需要对机具的工作状态和抬升状态进行判别标定,其机具姿态判别的工作流程如图 6 所示。

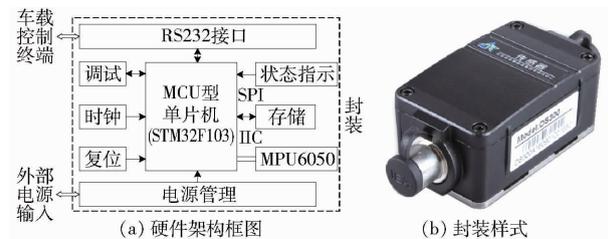


图 5 机具姿态监测传感器

Fig.5 Attitude monitoring sensor

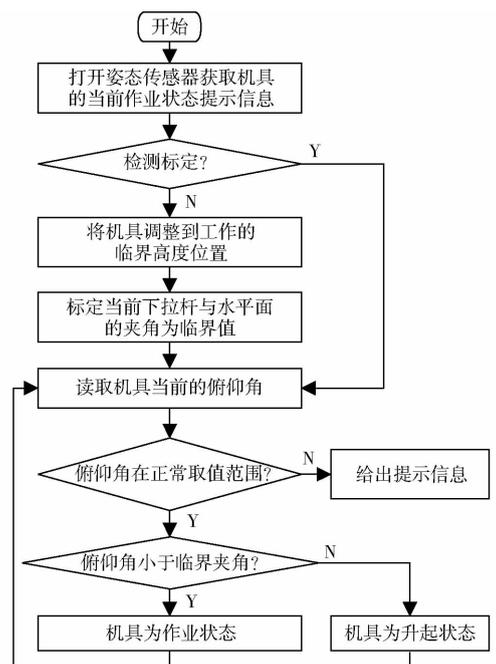


图 6 姿态判定方法流程图

Fig.6 Flow chart of attitude determination method

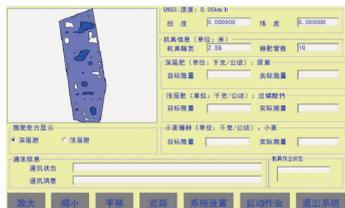
### 2.3 PID 控制器

PID 控制器的主要功能是接收车载控制终端下传的液压马达目标转速信号,根据该信号控制比例阀的开度,调节马达的转速,驱动排肥排种轴转动,并将光电转速测试马达获取的排肥排种轴实时转速数据上传至车载控制终端。控制器作为上位机与执行机构的连接纽带,其性能好坏将直接影响控制系统的精度和稳定性<sup>[27]</sup>。德国力士乐公司生产的 RC 系列控制器能够实现比例电磁铁与其他开关功能的可编程控制,支持模拟电压、模拟电流、开关信息以及频率作为输入信号处理,同时对过压、电气干扰提供保护<sup>[28]</sup>。RC 系列控制器提供 CAN 总线接口,方便与其它总线设备进行数据通信。此外,RC 系列控制器调试方便,提供 RS232 串行接口,可以直接与装有 BODEM 软件的便携式电脑连接,进行过程变量诊断、参数设置或过程变量显示等功能。

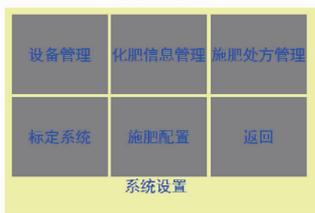
选择 RC 控制器内部集成的 PID 调节方式实现液压马达的自测速闭环稳定控制,其中比例系数  $K_p$  为 0.2,积分时间常数  $T_i$  为 0.15,微分时间常数  $T_d$  为 0.15,采样节拍周期  $T$  为 1 ms。

### 3 人机交互系统软件设计

根据图 2 所示的控制系统工作原理,应用 eMbedded VisualC++ 集成开发环境,进行人机交互系统软件设计,软件操作界面如图 7 所示。软件的主界面可以实时显示机具的作业速度、经纬度、机具作业姿态、设备参数、肥料种子目标和实际施播量、通讯状态等信息。通过点击主页面的系统设置按钮,使用者可以根据实际作业需求对设备参数、系统标定、化肥信息、施肥配置及施肥处方管理进行设置,如图 7b 所示。该软件操作便捷,将系统设置信息完善后,只需点击主界面上的启动作业按钮,系统



(a) 主界面



(b) 系统设置界面

图 7 软件操作界面

Fig. 7 Software control interface

会根据机具的作业姿态和前进速度自动控制施肥和播种量,田间作业完毕后,点击主界面的退出系统按钮,即可完成系统的关机操作。

软件的操作系统可以根据机具的作业姿态、前进速度、深层肥料、浅层肥料和小麦种子的施播量要求,进行精准排施作业。该软件应用于本研究团队前期设计的小麦基肥精准分层施肥播种机具,该机具的作业幅宽为 2.55 m,一个行程可以完成 10 行施肥播种作业,设浅层、深层排肥器和小麦排种器旋转一周的排量为 15 g,则机具设备参数、前进速度、肥料种子目标施播量和实际施播量之间满足数学关系<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} 15 \times 10 \times \frac{nt}{60} = 1\ 000GS \\ t = \frac{l}{v} \\ l = \frac{1\ 000S}{2.55} \\ G = \frac{100n}{9v} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $n$ ——排肥排种轴转速, r/min

$t$ ——时间, s

$S$ ——作业面积,  $\text{hm}^2$

$G$ ——肥料和小麦的目标施播量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

$l$ ——机具行驶距离, m

$v$ ——机具行驶速度,  $\text{m}/\text{s}$

### 4 试验与结果分析

#### 4.1 试验方法

为了测试精准排肥播种控制系统的可靠性和稳定性,参照 GB/T 20346.1—2006《施肥机械试验方法》第 1 部分全幅宽施肥机的试验方法,于 2017 年 9—10 月在北京市昌平区小汤山国家精准农业示范基地进行静态标定试验和动态试验。其中静态标定试验场所选用平整性较好的晒场(图 8a),长度为 150 m,化肥和种子物料分别选用磷酸二胺(云南三环中化化肥有限公司)和京冬 22 号小麦种子。动态试验在收获玉米后的农田茬地进行(图 8b)。



(a) 静态试验



(b) 动态试验

图 8 控制系统的性能试验

Fig. 8 Performance test of control system

#### 4.1.1 排量标定方法

选择 10、20、30、40、50、60 r/min 共 6 个排肥排种轴转速水平,每次试验使液压马达稳定运行 30 s,将收集的肥料和种子进行称量,每次试验进行 3 次重复,将排肥排种器的排肥轴旋转 1 周的排量数据填入主程序的排量标定系统。

#### 4.1.2 姿态标定方法

将处于悬挂状态的机具平放在地面,使用角度测量仪(博世 GLM80 型),测量拖拉机下拉杆与水平地面的夹角,重复 3 次,取其平均值,输入主程序的姿态标定系统。

#### 4.1.3 动态试验方法

将浅层施肥、深层施肥和小麦的目标排量分别设置 150、300、225 kg/hm<sup>2</sup>,机具在工作姿态下,以 5 km/h 的速度直线前进 100 m,在机具抬升姿态下,以 3 km/h 的速度直线前进 20 m,以模拟机具的掉头工作状态。试验过程中,使用收纳袋对肥料和小麦的排出量进行收集,并进行称量,每次试验进行 3 次

重复,分别取其平均值。

#### 4.2 静态标定试验结果分析

##### 4.2.1 排量标定

对不同转速水平下肥料和种子排量数据进行整理,浅层肥料、深层肥料和种子排量散点图如图 9 所示,其中纵轴表示 30 s 内的总排量,并对转速和排量之间数学关系进行一次线性回归分析。标定试验时系统稳定运行 30 s,按照

$$m = \frac{2M}{n} \quad (2)$$

式中  $M$ ——30 s 内排肥排种器排出肥料或种子的质量, g

$m$ ——排肥排种轴旋转 1 周排出肥料或种子的质量, g

可以求得排肥排种轴旋转 1 周的排出量,浅层肥料、深层肥料和种子在排肥排种轴的作用下旋转 1 周的排出量如表 2 所示。

由图 9 可知,排肥排种轴的转速与浅层肥料、深

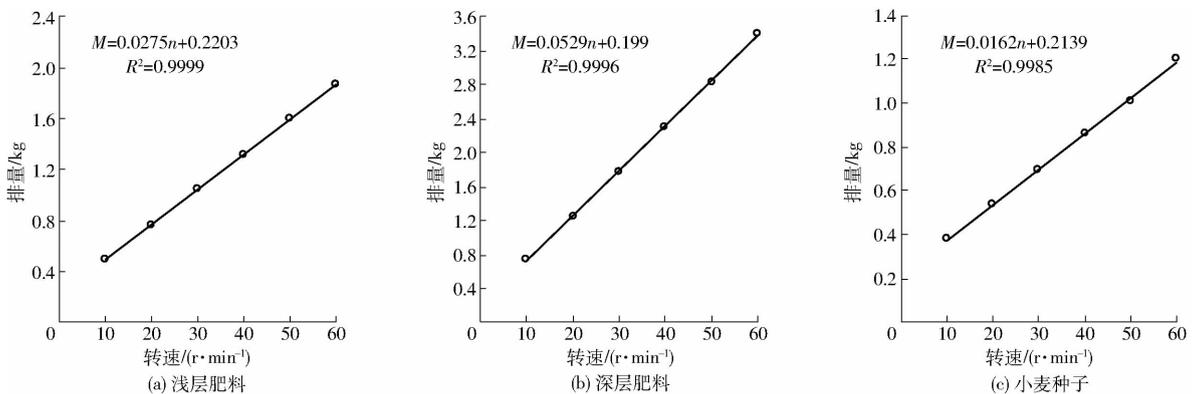


图 9 排量与排肥排种轴转速的关系

Fig. 9 Relationship between material and rotary speed of fertilizer or seed discharge axis

表 2 排肥排种轴旋转 1 周的排量

Tab. 2 Displacement of fertilizer or seed discharge axis at one row g

类别	转速/(r·min <sup>-1</sup> )						平均值
	10	20	30	40	50	60	
浅层肥	24.70	19.28	17.52	16.46	16.04	15.58	16.97
深层肥	37.05	31.45	29.68	28.83	28.21	28.37	29.31
种子	19.15	13.48	11.63	10.73	10.08	10.05	11.20

层肥料、种子一次线性回归模型的确定系数分别为 0.999 9、0.999 6 和 0.998 5,说明控制系统的排肥排种量与转速呈线性关系,可以按照转速与排量的一元拟合线性关系对肥料和种子进行精准控制;另外,对比浅层肥料、深层肥料和种子线性拟合优度值,可知种子拟合优度较低,这应该与物料的物理特性有关,小麦种子近似椭球型,肥料颗粒近似球形,在排出过程中,肥料颗粒相对于小麦颗粒,被均匀排出的效果更好<sup>[29]</sup>。

由表 2 可知,随着排肥排种轴的转速逐渐增大,肥料和种子的单圈排量均值逐渐降低,当转速大于 20 r/min 时,单圈排量趋于稳定,出现这种状况的原因与机具选用的外槽轮式排肥排种器有关,已有研究表明,当外槽轮排肥器的转速较低时,其排肥稳定性较差<sup>[30-31]</sup>,因此出现这种状况与系统的稳定性和可靠性无关,同时应该主动调节外槽轮排肥排种器的槽轮有效长度,使外槽轮排肥排种器的转速稳定在 20 r/min 以上。鉴于转速小于 20 r/min 时,排肥排种器的稳定性较差,取转速为 20、30、40、50、60 r/min 的 5 种单圈排量的均值作为排量标定结果,其中浅层肥料、深层肥料和种子的单圈排量分别为 16.97、29.31、11.2 g,并将这 3 组数据输入系统的排量标定对话框中。

##### 4.2.2 作业姿态标定

通过测量机具平放在地面时,拖拉机的下拉杆与水平地面的角度,对作业姿态进行标定,实际测量

平均值为  $5.3^\circ$ , 并将该值输入系统的作业姿态, 设置该值为机具升降状态的临界角, 当下拉杆的位置在临界角之下时, 系统显示机具为工作状态, 当下拉杆的位置在临界角之上时, 系统显示机具为抬升状态。

标定完成后, 操作拖拉机, 使下拉杆与水平面夹角分别处于  $10^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $-5^\circ$  的 4 种状态, 观察软件操作界面的机具姿态提示信息, 结果显示,  $10^\circ$ 、 $0^\circ$  和  $-5^\circ$  时, 软件显示机具姿态准确, 其中夹角为  $5^\circ$  时软件显示机具为抬升状态, 出现这种状态的原因, 应该与传感器的安装误差有关, 鉴于机具在实际作业

过程中, 下拉杆与水平面的夹角远小于  $5.3^\circ$ , 因此该误差在可以接收范围内。

### 4.3 动态试验结果分析

在机具工作姿态下, 对浅层肥料、深层肥料和种子的排量数据进行整理, 如表 3 所示。由表 3 可知, 浅层肥料的排量变异系数为 3.5%, 深层肥料的排量变异系数为 3.8%, 种子排量变异系数为 3.0%, 3 路排肥排种器的排量偏差都控制在 5% 以内, 说明控制系统的运行过程总体比较稳定, 能够满足小麦基肥分层施肥播种机具的精度排肥排种的作业要求。

表 3 动态试验结果  
Tab.3 Dynamic test results

排施对象	目标排量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	最大排量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	最小排量/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	平均值/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	标准差/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	变异系数/%
浅层肥料	150	162	144	153	5.4	3.5
深层肥料	300	311	282	297	11.3	3.8
小麦种子	225	232	219	224	6.7	3.0

在机具抬升状态下, 对肥料和种子排出量进行收集和观察, 排肥排种轴始终处于静止状态, 不存在肥料和种子排出现象, 说明机具在抬升状态或掉头过程中, 尽管拥有作业速度, 但控制系统能够自动调节比例阀的开合, 减少人为操作流程, 避免化肥和种子的浪费。

## 5 结论

(1) 针对小麦基肥分层施肥播种机具的精准作业控制的需要, 开发基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统, 该系统主要由车载控制终端、PID 控制器、多路集成比例阀、机具姿态解析模块、机具位置与速度解析模块、液压马达等组成, 能够根据机具的作业姿态和前进速度自动控制浅层肥料、

深层肥料和种子的排量。

(2) 对系统进行静态标定试验和动态试验, 静态排量标定结果表明, 马达转速与系统的排肥排种量存在一元线性关系, 此时浅层肥料、深层肥料和种子的单圈排量分别为 16.97、29.31、11.2 g; 姿态标定结果表明, 设置临界角为  $5.3^\circ$  时, 系统的机具姿态提示信息正确, 能够满足姿态监测的要求。动态试验表明, 机具工作状态下, 浅层肥料、深层肥料和种子排量变异系数分别为 3.5%、3.8% 和 3.0%, 3 路排肥排种器的排量偏差都控制在 5% 以内, 机具抬升状态下, 排肥排种轴处于静止状态, 说明该系统的运行过程总体比较稳定, 能够满足小麦基肥分层施肥播种机具的精度排肥排种的作业要求, 同时能够减少人为操作流程。

## 参 考 文 献

- ZHANG Weifeng, CAO Guoxin, LI Xiaolin, et al. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers[J]. Nature, 2016, 537(7622): 671.
- 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.  
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)
- 赵春江, 杨信廷, 李斌, 等. 中国农业信息技术发展回顾及展望[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 172-178.  
ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, LI Bin, et al. The retrospect and prospect of agricultural information technology in China[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 172-178. (in Chinese)
- 李洁, 赵立新, 毕建杰, 等. 小麦双线精播智能控制系统的设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 134-140.  
LI Jie, ZHAO Lixin, BI Jianjie, et al. Design of intelligent control system for two-row precise seeding of wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 1): 134-140. (in Chinese)
- 苑严伟, 张小超, 吴才聪, 等. 玉米免耕播种施肥机精准作业监控系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 222-226.  
YUAN Yanwei, ZHANG Xiaochao, WU Caicong, et al. Precision control system of no-tillage corn planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 222-226. (in Chinese)
- 陈桂芬, 马丽, 陈航. 精准施肥技术的研究现状与发展趋势[J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35(3): 253-259.

- CHEN Guifen, MA Li, CHEN Hang. Research status and development trend of precision fertilization technology[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2013, 35(3): 253-259. (in Chinese)
- 7 丁友强,杨丽,张东兴,等. 基于GPS测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 42-49. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180805&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180805&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.005.
- DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 42-49. (in Chinese)
- 8 左兴健,武广伟,付卫强,等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 14-21.
- ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 14-21. (in Chinese)
- 9 TOLA E, KATAOKA T, BURCE M, et al. Granular fertiliser application rate control system with integrated output volume measurement[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 411-416.
- 10 孟志军,赵春江,付卫强,等. 变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 204-209.
- MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, FU Weiqiang, et al. Prescription map identification and position lag calibration method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 204-209. (in Chinese)
- 11 孟志军,赵春江,刘卉,等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(4): 338-342.
- MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, LIU Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granule application system[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(4): 338-342. (in Chinese)
- 12 孟志军,赵春江,王秀,等. 基于GPS的农田多源信息采集系统的研究与开发[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 13-18.
- MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, WANG Xiu, et al. Field multi-source information collection system based on GPS for precision agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 13-18. (in Chinese)
- 13 汪小昆,陈满,孙国祥,等. 冬小麦变量施肥机控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 88-92.
- WANG Xiaokun, CHEN Man, SUN Guoxiang, et al. Design and test of control system on variable fertilizer applicator for winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.2): 88-92. (in Chinese)
- 14 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, 171.
- 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, 171. (in Chinese)
- 15 SU Ning, XU Taosheng, SONG Liangtu, et al. Variable rate fertilization system with adjustable active feed-roll length[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(4): 19-26.
- 16 戴飞,辛尚龙,赵武云,等. 全膜面覆土式马铃薯播种联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 76-83, 56. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170309&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170309&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.009.
- DAI Fei, XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of combined potato planting machine for covering soil on top of full film surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 76-83, 56. (in Chinese)
- 17 田斌,韩少平,吴建民. 2BMFSG-3/6型固定道作业免耕施肥播种机的设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 187-189.
- 18 祝清震,武广伟,安晓飞,等. 基肥定深施用装置排肥口位置与施肥深度关系模型[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 8-17.
- ZHU Qingzhen, WU Guangwei, AN Xiaofei, et al. Relationship model of fertilizer outlet location and fertilizer application depth of depth-fixed application device of base-fertilizer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 8-17. (in Chinese)
- 19 祝清震,武广伟,陈立平,等. 基于旋耕覆土的冬小麦基肥分层定深施用装置设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 18-26.
- ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Design of stratified and depth-fixed application device of base-fertilizer for winter wheat based on soil-covering rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 18-26. (in Chinese)
- 20 付乾坤,荐世春,贾洪雷,等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 9-16.
- FU Qiankun, JIAN Shichun, JIA Honglei, et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 9-16. (in Chinese)
- 21 张军昌,闫小丽,薛少平,等. 秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 51-55. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20121210&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121210&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.010.
- ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, XUE Shaoping, et al. Design of no-tillage maize planter with straw smashing and fertilizing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 51-55. (in Chinese)
- 22 付卫强,孟志军,黄文倩,等. 基于CAN总线的变量施肥控制系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊2): 127-132.
- FU Weiqiang, MENG Zhijun, HUANG Wenqian, et al. Variable rate fertilizer control system based on CAN bus[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(Supp.2): 127-132. (in Chinese)

- 23 孟志军,刘卉,付卫强,等. 农田作业机械测速方法试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 141-145.  
MENG Zhijun, LIU Hui, FU Weiqiang, et al. Evaluation of ground speed measurements for agricultural machinery [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 141-145. (in Chinese)
- 24 王秀,赵春江,孟志军,等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 114-117.  
WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 114-117. (in Chinese)
- 25 赵静,曹冲. GNSS 系统及其技术的发展研究[J]. 全球定位系统, 2008, 33(5): 27-31.  
ZHAO Jing, CAO Chong. The development trend investigation of GNSS system and its technologies [J]. GNSS World of China, 2008, 33(5): 27-31. (in Chinese)
- 26 尹彦鑫,王成,孟志军,等. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 68-74. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180408&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180408&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.008.  
YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 68-74. (in Chinese)
- 27 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)
- 28 吉建斌,王秀,张文爱. 半自动变量施肥控制器的研究与开发[J]. 农机化研究, 2009, 31(11): 65-68.  
JI Jianbin, WANG Xiu, ZHANG Wenai. Study and development on the controller of semi-automatic variable rate fertilizer applicator [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(11): 65-68. (in Chinese)
- 29 刘凡一,张舰,李博,等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253.  
LIU Fanyi, ZHANG Jian, LI Bo, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 247-253. (in Chinese)
- 30 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170712&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170712&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012.  
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. (in Chinese)
- 31 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)

---

(上接第 82 页)

- 19 TAKASHI F, KUNIO S, TAKASHI O, et al. Growth characteristics of cabbage plug seedlings due to mutual shading among neighbouring seedlings [J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 77-84.
- 20 刘洋,毛罕平,韩绿化,等. 基于 Micro-CT 的黄瓜苗坨夹取破损检测及取苗参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 27-34.  
LIU Yang, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Plug damage detection and parameter optimization of picking up cucumber seedlings from tray cells based on Micro-CT [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 27-34. (in Chinese)
- 21 MOONEY S J, PRIDMORE T P, HELLIWELL J, et al. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil [J]. Plant and Soil, 2012, 352: 1-22.
- 22 ALAMEDA D, ANTEN N P R, VOLLAR R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress [J]. Soil and Tillage Research, 2012, 120: 121-129.
- 23 陈立周. 机械优化设计方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 2003.
- 24 胡建平,杨丽红,常航,等. 一种自动移栽机取苗控制系统及其控制方法:201610913731.4[P]. 2017-04-19.
- 25 韩绿化,毛罕平,缪小花,等. 基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 260-265. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20131144&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131144&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.044.  
HAN Lühua, MAO Hanping, MIAO Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 260-265. (in Chinese)