

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.003

# 小麦小区播种机排种控制系统设计与试验

程修沛<sup>1,2</sup> 李洪文<sup>1,2</sup> 王庆杰<sup>1,2</sup> 何进<sup>1,2</sup> 卢彩云<sup>1,2</sup> 杨薇<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测实验站, 北京 100083;  
3. 中机美诺科技股份有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 为了提高小区播种机自动化水平, 解决传统小区播种机械作业参数不易调节等问题, 设计了一种基于 STM32 的小麦小区播种机排种控制系统。该系统主要由 Android 终端、STM32 主控制系统、存种筒提升控制系统、锥体格盘控制系统以及分种器控制系统等组成, 确定存种筒延迟落下时间, 分别建立步进电机和直流电机调速模型, 设计人机交互界面进行作业参数设置, 实现了小区排种作业参数与实际作业需求的快速匹配。搭建室内试验台, 以锥体格盘转速、分种器转速为试验因素, 以行间均匀性变异系数为评价指标进行试验。试验结果表明, 锥体格盘转速、分种器转速以及两者之间的交互作用对行间均匀性均有非常显著的影响; 当锥体格盘转速为 4 r/min、分种器转速为 1 250 r/min 时, 行间均匀性变异系数均值为 4.53%, 行间均匀性较好, 且籽粒破碎率较低。该系统实现了小区排种作业精确控制, 为小区播种的智能化控制提供了技术支撑。

**关键词:** 小麦; 小区播种机; 控制系统; 行间均匀性

**中图分类号:** S223.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0030-09

## Design and Experiment of Wheat Seeding Control System in Plot Seeder

CHENG Xiupei<sup>1,2</sup> LI Hongwen<sup>1,2</sup> WANG Qingjie<sup>1,2</sup> HE Jin<sup>1,2</sup> LU Caiyun<sup>1,2</sup> YANG Wei<sup>3</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Agricultural Science Observation and Experiment Station of Arable Land Conservation (Northern Hebei Province),  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China

3. Menoble Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** As a special machinery for field breeding experiments, the plot seeder has a very important role in improving efficiency of breeding, reducing labor intensity and costs, as well as ensuring scientific nature and accuracy of test results. In order to improve the mechanization and automation level of the plot seeder and solve the problem that it is difficult to adjust the operating parameters, a wheat plot seeding control system based on STM32 was developed. The system was mainly composed of an Android mobile phone terminal, main controller of STM32, lifting system of storage cylinder, control system of cone compartment tray for seed meter, and control system of seed dispenser. The stepper motor and direct current motor speed control model were established. And human-computer interaction interface was designed, which was used to set working parameters. For checking up the performance of wheat plot seeding control system in plot seeder and gaining better combination of parameters, indoor tests were carried out at three cone compartment tray rotation speed of 4 r/min, 6 r/min and 8 r/min, and four seed dispenser rotation speed of 1 100 r/min, 1 250 r/min, 1 400 r/min and 1 550 r/min. Test results showed that the cone compartment tray rotation speed, seed dispenser rotation speed, and the interaction of them had a very significant effect on the uniformity between rows by the analysis of variance. With the increase of rotating speed of the cone compartment tray, the variation coefficient of the uniformity between rows was increased. With the change of rotating speed of seed dispenser at 1 100 ~ 1 550 r/min, the variation coefficient of the seed uniformity was reduced firstly and then increased. When the rotating speed of the cone compartment tray and seed dispenser was 4 r/min and 1 250 r/min respectively, the variation

收稿日期: 2019-01-14 修回日期: 2019-02-23

基金项目: 现代农业产业技术体系建设项目(CARS-03)和国家重点研发计划项目(2017YFD0701201)

作者简介: 程修沛(1991—),男,博士生,主要从事小麦耕播技术与装备研究,E-mail: chengxiupei7088@163.com

通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

coefficient of uniformity between rows was 4.53%, of which the uniformity between rows was better and the grain damage rate was smaller. This control system could provide a research basis for the automation and intelligent control of plot seeding.

**Key words:** wheat; plot seeder; control system; uniformity between rows

## 0 引言

田间育种试验是为培育作物新品种在试验小区进行的小面积试验<sup>[1-2]</sup>,对于品种改良、繁殖良种等具有重要的意义。田间育种试验是一个复杂的农业系统工程,实现田间育种试验的机械化作业有利于提高育种的工作效率、降低劳动强度、减少成本,保证试验的科学性和准确性<sup>[3-4]</sup>。

小区播种机作为田间育种试验的专用机械,因试验小区面积小而数量多、品种多而播量少的特殊性,需具有定量播种、自动清种、间隔播种、连续播种等要求<sup>[5-7]</sup>。经过几十年的研究与推广,国外小区播种机械商业化程度高,技术与装备逐渐向自动化、智能化方向发展,如 Wintersteiger 公司生产的小区播种机配套 GPS、播种信息软件,能够实现播前规划、播中监测以及播后信息处理等功能<sup>[7-8]</sup>,但其价格昂贵,不能很好地满足国内育种机械需求<sup>[9]</sup>。

国内小区播种以人工为主,其劳动强度大、作业可靠性低、品种多而不能做到同期播种等,制约了育种产业发展<sup>[10]</sup>,国内相关学者从参数优化、关键部件优化改进等方面进行了研究<sup>[11-12]</sup>。然而,现有的小区播种机自动化水平低<sup>[13]</sup>,排种作业参数不易设置和调节,小区播种质量差,严重影响小区育种试验的科学性。锥体格盘采用地轮或驱动轮驱动,每次需要调节机械传动比,以满足不同长度小区对锥体格盘转速的要求<sup>[14]</sup>;分种器多采用固定转速,无法满足不同品种、不同长度小区播种对转速的需求,达不到较优的作业水平,易出现播种均匀性差的问题。针对以上问题,龚丽农等<sup>[15]</sup>对小区播种机电控系统进行了设计,刘业宇等<sup>[9]</sup>研究了里下河小麦小区播种机,为后续研究打下了基础。

本文设计一种基于 STM32 的小麦小区播种机排种控制系统,以 STM32 为主控制系统,采用 Android 终端进行人机交互,由电磁阀控制存种筒提升、步进电机驱动锥体格盘、直流无刷电机驱动分种器,解决排种作业参数不易调节、排种精度差等问题,提高小区播种机械的自动化水平。

## 1 系统结构与工作原理

小区排种控制系统主要由 STM32 主控制系统、Android 终端、存种筒提升控制系统、锥体格盘控制

系统和分种器控制系统等组成,如图 1 所示。其中,STM32 主控制系统由 STM32F407 单片机、数据传输模块组成;存种筒提升控制系统由电磁阀、光耦隔离型继电器和存种筒组成;锥体格盘控制系统由 MOS 效应管、步进电机、步进电机驱动器和锥体格盘装置组成;分种器控制系统由直流无刷电机、直流无刷电机驱动器和分种器等组成。通过设计排种控制系统,能够采用 Android 终端对小区排种作业参数进行设置,实现存种筒提升、锥体格盘转速和分种器转速的机电控制,达到提高小区播种精度的目的。

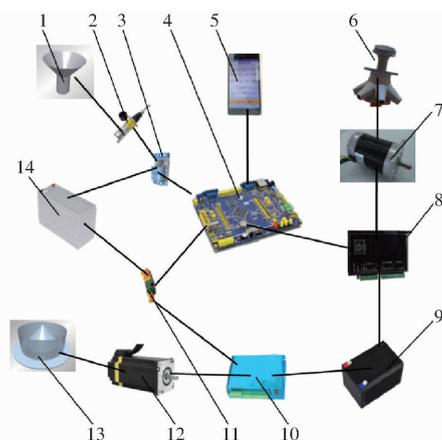


图 1 小区排种控制系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of plot sowing control system

1. 存种筒 2. 电磁阀 3. 继电器 4. STM32F407 单片机 5. Android 终端 6. 离心分种器 7. 直流无刷电机 8. 直流无刷电机驱动器 9. 24 V 电源 10. 步进电机驱动器 11. MOS 效应管 12. 步进电机 13. 锥体格盘 14. 12 V 电源

工作时,育种人员根据播前小区育种规划,通过 Android 终端进行小区排种作业参数设置;设置完成后,Android 终端通过蓝牙通讯将参数传输给 STM32F407 单片机,STM32 对数据进行解析,改变相应 PWM 控制信号的占空比或脉冲频率,从而达到控制锥体格盘转速和分种器转速的目的;存种筒提升采用 Android 终端控制的方式,Android 终端控制是通过控制电磁阀的吸合,进而控制存种筒的提升与回位。

当改变作业参数进行匹配时,通过 Android 终端的人机交互界面即可完成参数设置,避免了传统小区播种机械改变作业参数需要人工调节机械机构、费时费力等问题,满足了不同种子对作业参数的不同需求,提高了育种试验精度。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 控制系统总体设计

小区排种控制系统以单片机 STM32F407 为主处理核心,以无线蓝牙通讯为数据传输方式,

以 Android 平台为控制终端,完成对小区锥体格盘转速、分种器转速的设置和调节,以及设置延时时间完成提升筒的提升与回位,并在特殊情况或结束时停车,控制系统整体电路如图 2 所示。

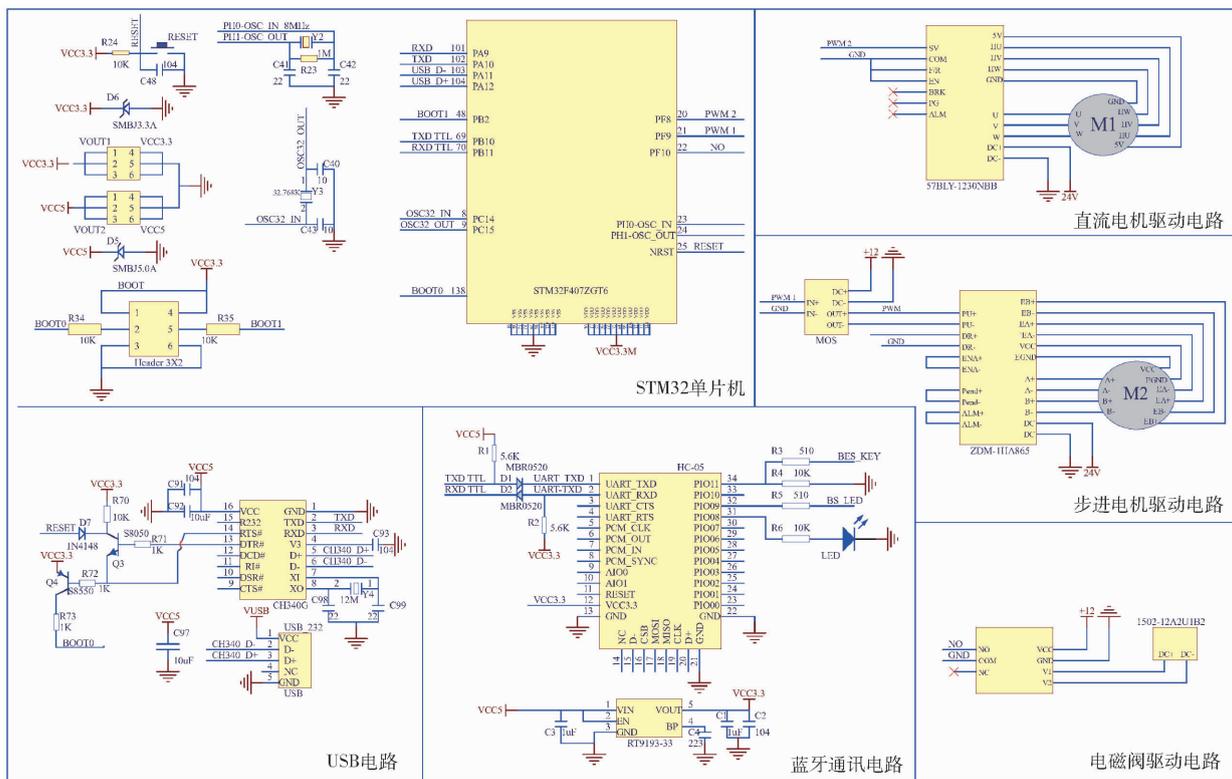


图 2 控制系统整体电路图

Fig. 2 Overall circuit diagram of control system

### 2.2 STM32 主控制系统

#### 2.2.1 STM32 单片机

STM32 单片机作为小区排种控制系统的核心,主要完成对上位机指令信息的接收与应答,对步进电机、直流电机以及电磁阀的控制等功能。采用以 STM32F407ZGT6 为主芯片的单片机, Cortex M4 为系统内核,具有 1 MB 的 Flash 存储器,主频最高达 168 MHz,共有 IO 端口 112 个,有 12 个 16 位定时器和 2 个 32 位定时器<sup>[16]</sup>,满足扩展控制多个小区排种单体的需求。

如图 2 所示,PF8 为控制锥体格盘转速的 PWM 1 脉冲发生端口,通过改变占空比来控制直流无刷电机转速;PF9 为控制分种器转速的 PWM 2 脉冲输出端口,采用脉冲频率调节的方式进行步进电机转速控制;PF10 为电磁阀的控制端口,置 1 或置 0 完成高低电平的转换进行电磁阀吸断,进而实现存种筒提升或回位。

#### 2.2.2 数据传输模块

Android 终端与 STM32 单片机之间的数据传输采用无线蓝牙通讯方式,选择 ATK-HC05 蓝牙串

口模块,原理如图 2 蓝牙通讯电路部分所示,采用透传方式与上位机进行通讯<sup>[17]</sup>,波特率支持 4 800 ~ 1 382 400 b/s,兼容不同电压的单片机系统,如 3.3 V 的 STM32 系列单片机,与计算机、手机、PDA 等智能终端相互连接,使用简单,比较稳定。

### 2.3 存种筒提升控制系统

小区排种装置的存种筒提升是通过电磁阀的吸合来完成,安装如图 3 所示。电磁阀没有通电吸合时,存种筒与锥体紧密贴合,处于存种状态;当电磁



图 3 电磁阀安装位置

Fig. 3 Installation position of solenoid valve

阀上电时,电磁阀内部线圈得电产生吸力,将提升杠杆下拉带动存种筒提升进行落种;落种过程延时断电,落种完成后,电磁阀断电,吸力消失,提升杠杆回落,存种筒回位,进行下次存种。

系统选用伍德沃德公司的 1502-12A2U1B2 型电磁阀,额定电压 12 V。STM32 单片机不足以驱动电磁阀动作,因此单片机与电磁阀之间搭接光耦隔离型继电器,用于低电平信号驱动高压电磁阀。由控制原理图 2 所示,继电器 NO 端与 STM32 的 PF10 端口相连,高低电平信号经过光耦隔离型继电器,控制 12 V 电源的通断,实现电磁阀吸合和断开。

## 2.4 锥体格盘控制系统

锥体格盘控制系统硬件主要由锥体格盘装置、步进电机、步进电机驱动器以及放大驱动模块等组成。选用 60EBP143ALC-TFO 型闭环步进电机,电源为 DC 24~110 V,配带光电式编码器,配有 ZDM-2HA865 型全数字闭环伺服步进电机驱动器,提供 16 挡细分选择,最大能够达到 51 200 p/r,与主控制系统连接实现对步进电机的闭环控制,步进电机与驱动器如图 4 所示。放大驱动模块采用深圳市粤豫电子科技有限公司生产的 YYMOS-1 型场效应管,输入输出电压 3.3~24 V,最大频率为 100 kHz,其功能为完成 PWM 波形放大。



图4 步进电机及驱动器

Fig. 4 Stepper motor and driver

60EBP143ALC-TFO 型闭环步进电机控制信号由 5~24 V 驱动,STM32 单片机 IO 端口电压多为 3.3 V,部分会兼容 5 V,但驱动能力弱,不足以驱动步进电机转动。因此,单片机与步进电机驱动电路之间增加放大驱动模块,提高驱动能力,原理如图 2 所示步进电路驱动部分,电路实现了 STM32 引脚端口 PF9 发送 3.3 V 的 PWM 1 控制信号,经过放大驱动模块电压形成 12 V 的 PWM 信号,实现步进电机的驱动控制和调速,进而实现锥体格盘转速控制。

## 2.5 分种器控制系统

分种器采用 57BLY-1230NBB 型直流无刷电机带动,直流电源 24 V,额定功率 125 W,转速最高 3 000 r/min;相匹配的为 BLD-300B 型驱动器,输入 18~50 V 直流电源,即可由电位器实现手动调速,又可应用于上位机的 PWM 或模拟量信号控制,直流电机与驱动器如图 5 所示,原理如图 2 所示直流电机驱动电路部分。



图5 直流电机及驱动器

Fig. 5 Direct current motor and driver

其中,SV 端口为控制分种器转速的 PWM 2 脉冲信号的输入端,与主控制器 IO 口 PF8 相连接;F/R 为正反转控制端,EN 为控制信号使能端,低电平有效运行;霍尔传感器输入电源为 5 V,HU、HV、HW 分别与直流无刷电机的霍尔传感器 A、B、C 相接;驱动器 U、V、W 接口对应直流无刷电机绕组 A 相、B 相和 C 相。

## 3 系统软件设计

### 3.1 控制系统流程

STM32F407 接收到 Android 传输的信息,对协议进行解析,以获得不同的控制指令,进而完成对小麦小区排种装置的控制,控制系统工作流程如图 6 所示。正常作业情况下,可以对锥体格盘转速、分种器转速以及存种筒提升进行分别控制,相互之间不受影响;在需要紧急停止的情况下,能够直接完成 3 路控制,起到保护作用。

### 3.2 存种筒延迟落下时间确定

存种筒与锥体紧密贴合形成存种空间,当存种筒提升时,存种筒与锥体有一定的间隙,此时种子沿间隙均匀滑落,进行格盘充种;最后一粒种子完全脱离存种筒与锥体形成的充种区域后,此时存种筒可以下落,再次与锥体形成闭合空间,等待下一次倒入种子,为下一小区播种作业做准备。

本文设计的存种筒提升由电磁阀控制,小麦颗粒开始下落至全部种子离开存种空间的时间段内电磁阀应处于吸合状态。由于种子落下时间比较短,采用常规观察进行时间确定时会出现人眼反应延迟的问题,因此借用 EDEM 离散元仿真方法确定不同提升高度小麦颗粒的落下时间。小麦颗粒大小根据试验用品种进行设定,近似为椭圆柱体,以长度 6.2 mm、宽度和厚度 3.2 mm 为颗粒三维尺寸均值进行正态生成,其他参数由实测得到,仿真提升过程如图 7 所示。

如图 7 所示,直线为存种筒与锥体组成存种空间的边界,以存种筒开始提升为初始时间、最后颗粒脱离存种空间为结束时间,时间差即为小麦颗粒落下时间。

不同提升高度小麦颗粒落下时间如图 8 所示。

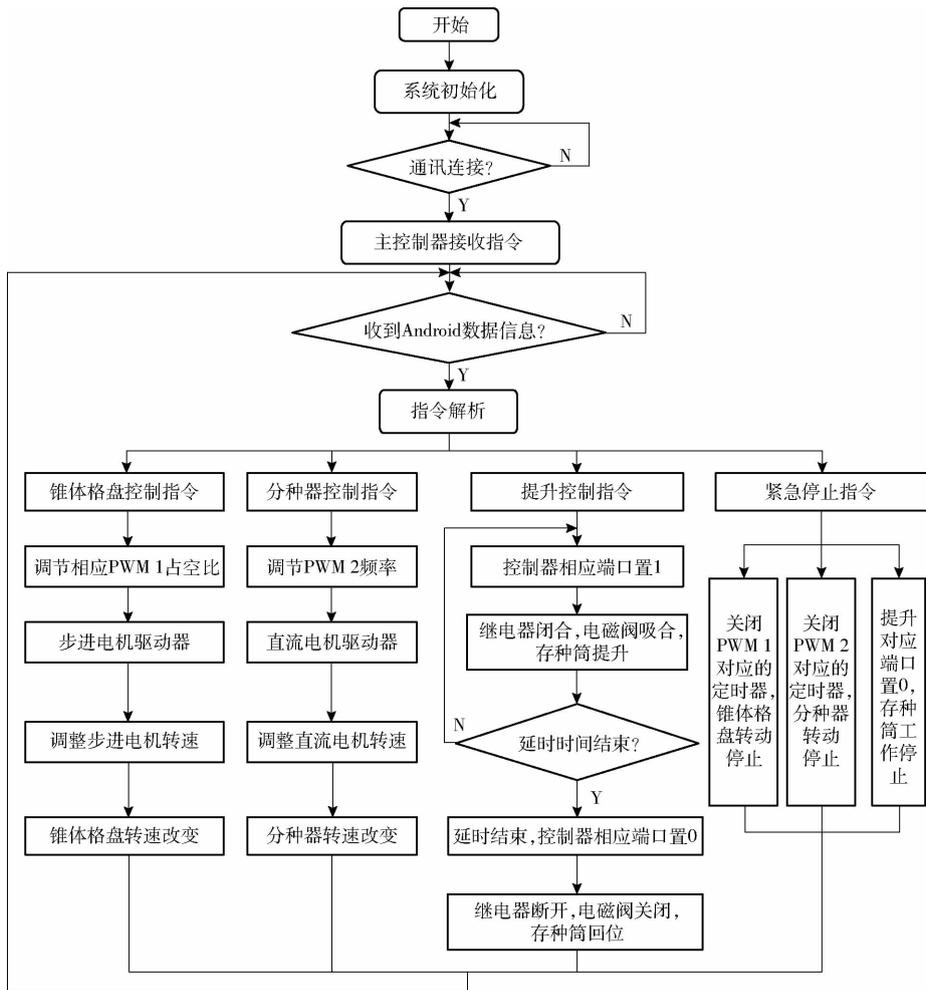


图6 控制流程图

Fig. 6 Flow chart of controller

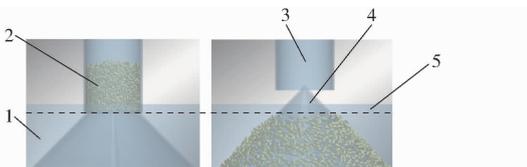


图7 存种筒提升仿真结果

Fig. 7 Simulation results of storage cylinder lifting

1. 外部隔板 2. 小麦颗粒 3. 存种筒 4. 锥体 5. 存种空间分界线

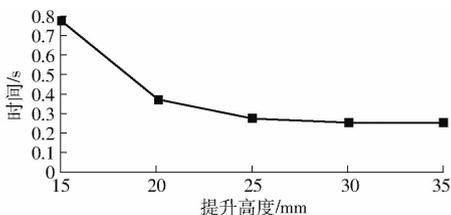


图8 种子落下时间与提升高度关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of seed drop time and lifting height

由图8可知,随着存种筒提升高度增大,落种时间逐渐减小,提升高度大于30 mm,种子落下时间为0.25 s,提升高度的增加对于种子落下时间的改变影响较小,趋于平稳。提升高度为15 mm时,种子落下时间为0.77 s,分别是提升高度20、25、30 mm时种子落下时间的2.08、2.85、3.08倍。

本文选取存种筒提升高度25 mm,则种子落下时间为0.27 s。综合考虑仿真误差与电磁阀频率,确定存种筒延迟落下时间 $t$ 为0.5 s。在本文试验中,存种筒提升符合作业要求,尚未出现种子没有完全脱离存种区域而存种筒落下的情况,但小区播量较大时,存种筒延迟落下时间应相应加大。

### 3.3 锥体格盘转速控制模型

步进电机经过减速机减速后,经过锥齿轮对换向带动锥体格盘,转速采用脉冲宽度调制(PWM)方法进行控制<sup>[18]</sup>,利用STM32控制器设置定时器装载值以及定时器捕获/比较值<sup>[19]</sup>,从而自动产生PWM波,通过改变脉冲频率的方式实现步进电机的调速,其实质为调整脉冲周期的时间,得到每秒不同的脉冲数,每秒所产生的脉冲数越大,步进电机转速越快,锥体格盘转速则越快。

本文选用60EBP143ALC-TF0型闭环步进电机,步距角为 $1.8^\circ$ ,则驱动器内部有细分情况下为细分值 $\times 200$  p/r;锥体格盘转速与脉冲频率之间的关系式为

$$n_0 = \frac{60f}{200N_0i} = \frac{3f}{10N_0i} \quad (1)$$

式中  $n_0$ ——锥体格盘转速, r/min  
 $f$ ——PWM 脉冲频率, Hz  
 $N_0$ ——驱动器内部细分值  
 $i$ ——减速机传动比

STM32 定时器占空比一定的情况下,通过改变自动重装载寄存器值实现脉冲频率的变化,自动重装载寄存器值与脉冲频率之间关系为

$$f = \frac{N_T}{(N_{psc} + 1)(N_{arr} + 1)} \quad (2)$$

式中  $N_T$ ——定时器最大频率, Hz  
 $N_{psc}$ ——预分频系数, 0 为不分频  
 $N_{arr}$ ——自动重装载寄存器值

联立式(1)和式(2),得到锥体格盘转速与自动重装载寄存器值之间的关系模型为

$$n_0 = \frac{3N_T}{10(N_{psc} + 1)(N_{arr} + 1)N_0i} \quad (3)$$

### 3.4 离心分种器转速控制曲线与关系

直流电机与步进电机控制方式类似,均采用脉冲宽度调制技术调速,不同点在于通过改变脉冲占空比的方式进行直流无刷电机的调速<sup>[20]</sup>。占空比越高,转速越大,反之越小,两者呈现正相关关系,但关系复杂,多采用实测办法进行确定。因此,为了得到直流无刷电机与占空比之间的关系,参考文献[21]方法与思路,以 1 kHz 为固定频率,以占空比 0~80% 变化范围,采用转速表进行实际测速,得到直流无刷电机转速与占空比之间的关系曲线如图 9 所示。

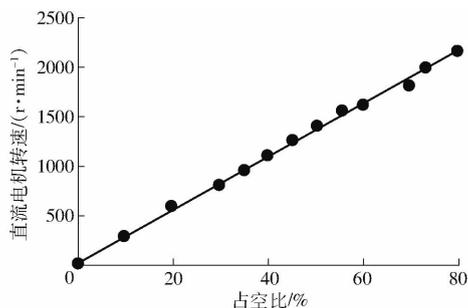


图9 直流电机转速与占空比关系曲线

Fig.9 Relationship between DC motor speed and duty cycle

以占空比为自变量  $x$ 、直流无刷电机转速为因变量  $y$ ,进行曲线拟合得到两者之间的关系式为

$$y = 27.087x \quad (4)$$

其中,  $R^2 = 0.9978$ ,说明直流无刷电机转速与占空比具有较好的拟合关系,将式(4)应用于直流无刷电机控制算法,从而能完成离心分种器转速的调节,转速调节范围 0~2 167 r/min,满足了小区播种机对分种器转速的需求。

### 3.5 Android 终端设计

人机交互界面基于 Java 语言在 Android Studio

开发环境下编译而成<sup>[22]</sup>,主要包括通讯连接、锥体格盘转速、离心分种器转速的作业参数设置,以及存种筒提升控制、紧急停止等功能,控制界面如图 10 所示。育种人员能够根据小区播种长度、播量与不同品种等信息进行作业参数匹配设置,以解决传统小区播种机人工调节锥体格盘转速传动比以及离心分种器转速无法现场调整等问题,使小区排种机构在较优的参数情况下运行。



图10 Andriod 终端人机交互界面

Fig.10 Interactive interface of Android mobile phone terminal

## 4 台架试验

### 4.1 试验设备与仪器

为了验证系统可靠性、稳定性,同时对锥体格盘转速、分种器转速进行参数优化,开展基于该排种系统的小区排种试验。以目前国内典型的锥体格盘式排种装置(中机美诺科技股份有限公司)为基础,搭配设计的控制系统,在中国农业大学保护性耕作实验室搭建试验台,主要包括台架、锥体、存种筒、漏斗、提升杠杆、分种机构以及所设计控制系统,如图 11 所示。为了便于试验后种子的收集和记录,分种机构下方布置集种袋进行种子收集。

采用美国 OHAUS 公司的 ARA520 型电子天平称量,称量范围为 0~1 500 g,精度 0.01 g。

### 4.2 试验材料

试验采用小麦品种为烟农 19,千粒质量 40 g 左右,随机选取 50 粒小麦颗粒对其进行三维尺寸测量,其长度方向范围为 5.35~6.96 mm,均值为 6.23 mm,长度尺寸变异系数为 6.13%,宽度和厚度范围分别为 2.63~3.48 mm 和 2.28~3.46 mm,均值分别为 3.23 mm 和 3.04 mm,变异系数为 7.76% 和 10.35%,宽度和厚度基本一致,小麦颗粒可以近似为椭圆柱体,各尺寸分布基本符合正态分布。

### 4.3 试验方法与指标

#### 4.3.1 试验因素

根据小区排种各因素对排种效果的影响,本试

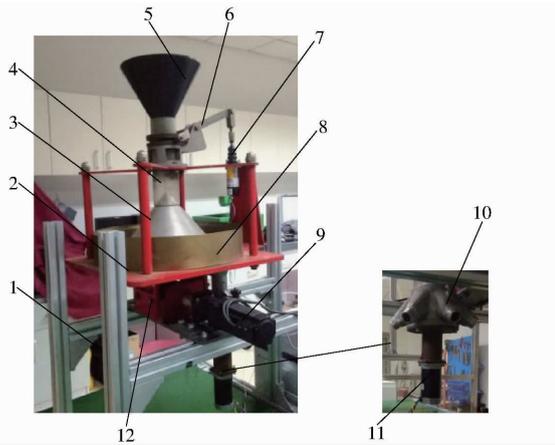


图 11 小区排种试验台

Fig. 11 Test bench of plot seeding

1. 台架 2. 底板 3. 锥体 4. 存种筒 5. 漏斗 6. 提升杠杆  
7. 电磁阀 8. 外部隔板 9. 步进电机 10. 分种机构 11. 直流电机 12. 锥齿轮

验主要分析锥体格盘转速和分种器转速对排种作业性能的影响。

**锥体格盘转速:**小区育种试验时,每完成一个小区的播种作业,锥体格盘正好旋转一周,种子无残留。播量一定的情况下,转速越快,每秒落种量则越多,对于分种器的要求就越高。当机具前进速度一定时,小区长度不同,则锥体格盘对应不同转速,因此本文选取锥体格盘转速分别为 4、6、8 r/min 进行试验。

**离心分种器转速:**根据文献[23-24]以及预试验发现,小麦育种试验分种器转速一般在 1 100 ~ 1 550 r/min 之间能取得较优的分配转速,因此本文选取分种器转速为 1 100、1 250、1 400、1 550 r/min 进行试验。

#### 4.3.2 试验内容与指标

选择行间均匀性变异系数作为试验指标<sup>[16]</sup>,分析锥体格盘转速和分种器转速对小区播种性能的影响规律,进行 12 组试验,每组试验重复 3 次。每次小区播种试验结束后,将各行种管所对应的集种袋依次取下,并采用电子天平进行称量,求各行种量均值、标准差,最终计算出行间均匀性变异系数。

#### 4.4 试验结果与分析

试验过程中,该控制系统稳定可靠,参数设置方便快捷,实现了锥体格盘排种装置的稳定控制,未出现系统停顿等现象,满足小区排种作业要求。基于该系统的参数优化试验结果如表 1 所示,双因素重复试验方差分析如表 2 所示,不同分种器转速和锥体格盘转速时的行间均匀性变异系数变化曲线如图 12 所示。

锥体格盘带动小麦种子依次经过排种口,不同

表 1 行间均匀性变异系数试验结果

Tab. 1 Test results of coefficient of variation at different rows

锥体格盘转速 $A/(r \cdot \min^{-1})$	分种器转速 $B/(r \cdot \min^{-1})$	行间均匀性变异系数/%			
		1	2	3	均值
4	1 100	5.22	5.42	5.39	5.34
	1 250	3.93	5.01	4.66	4.53
	1 400	5.84	5.37	5.52	5.58
	1 550	6.14	5.77	5.89	5.93
6	1 100	5.62	5.38	5.74	5.58
	1 250	5.05	5.28	5.19	5.17
	1 400	4.98	4.55	4.83	4.79
	1 550	6.52	7.06	7.23	6.94
8	1 100	7.36	6.13	7.22	6.90
	1 250	5.70	5.74	6.07	5.84
	1 400	5.39	5.23	5.96	5.53
	1 550	6.98	8.43	7.18	7.53

表 2 方差分析

Tab. 2 Analysis of variance

因素来源	平方和	自由度	均方	$F$	显著性
A	7.91	2	3.957	25.04	**
B	14.91	3	4.97	31.46	**
AB	3.96	6	0.66	4.18	**
误差	3.80	24	0.158		
总和	30.58	35			

注: \*\*表示在 0.01 水平下影响非常显著。

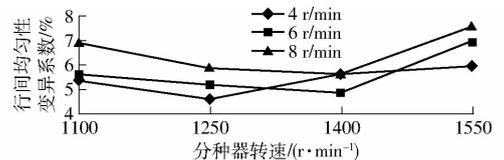


图 12 不同分种器转速和锥体格盘转速时的行间均匀性变异系数变化曲线

Fig. 12 Variation curves of variation coefficient between rows for different rotation speeds of seed dispenser and cone compartment tray

转速会形成不同的落种量,速度越高,单位时间落种量则越大,从而对分种均匀性造成影响。如表 1 所示,随着锥体格盘转速的增加,行间均匀性变异系数呈不断增加趋势,如锥体格盘转速 4 r/min 时,经过排种口的平均落种量为 5.0 g/s,平均行间均匀性变异系数为 5.35%,而锥体格盘转速分别为 6、8 r/min 时,平均落种量为 7.5、10.0 g/s,平均行间均匀性变异系数为 5.62%、6.45%,分别较 4 r/min 增加约 5.05% 和 20.56%;当锥体格盘转速增加,若要获得较优的分种均匀性效果,则分种器转速也相应增加,在锥体格盘转速为 4 r/min,较优的分种器转速为 1 250 r/min,行间均匀性变异系数 4.53%,而锥体格盘转速达到 6、8 r/min,较优的分种器转速

均为 1 400 r/min, 行间均匀性变异系数分别为 4.79%、5.53%。

由图 12 分析可知, 锥体格盘转速一定的条件下, 分种器转速在 1 100 ~ 1 550 r/min 变化, 行间均匀性变异系数均先减小后增大, 区别在位于谷点的转速各不相同, 分别为 1 250 r/min 和 1 400 r/min。离心分种器转速较小时, 行间均匀性变异系数较大, 其原因可能是由于转速较小, 尚未达到较优的离心分种速度, 不能将落下的种子均匀分开, 同时后续落下的种子对此前落下的种子造成干扰, 影响了分配均匀性, 如锥体格盘转速 8 r/min、分种器 1 100 r/min 时, 行间均匀性变异系数为 6.90%; 分种器转速较高时, 落下的小麦颗粒由于高转速可能会增大种群离心分配的无序性, 且部分颗粒由于回旋或碰撞折回等因素来不及分离出去, 被分种面重新带入到分种器空间, 增加了行间的不均匀性。

通过方差分析可知, 锥体格盘转速、分种器转速以及锥体格盘转速与分种器转速之间的交互作用对于行间均匀性变异系数均有非常显著影响。综合考虑, 较优参数组合为锥体格盘转速为 4 r/min、离心分种器转速为 1 250 r/min, 此时行间均匀性变异系数均值为 4.53%, 各行种管内种子一致性较好。

为了更好地反映排种性能, 同时对每次试验后的小麦颗粒进行观察, 将破损的种子进行收集称量, 统计发现 12 组试验均出现了不同程度的籽粒破损, 破损率在 0.12% ~ 0.25% 之间。其中锥体格盘转

速 4 r/min、分种器转速 1 250 r/min 时, 平均破损率较低, 为 0.12%; 锥体格盘转速 8 r/min、分种器转速 1 550 r/min, 出现了较高的籽粒破损率, 为 0.25%。

通过分析可知小麦籽粒破损的原因为: 由于结构和加工精度问题, 锥体格盘与底板、分种器与分种管外壳之间均存在一定的间隙, 作业过程中种子进入到间隙, 对颗粒造成摩擦损伤、挤压或剪切破碎; 小麦颗粒分种过程中颗粒与管壁产生多次碰撞, 增大籽粒破损的可能性。

## 5 结论

(1) 设计了小麦小区播种机排种控制系统, 以 STM32 单片机为控制核心, 确定存种筒延迟落下时间, 分别建立锥体格盘转速和分种器转速控制模型, 采用 Android 终端进行人机交互具有良好的操作性, 能够快速完成小区播种机排种作业参数设置, 实现了小区排种装置的精确控制, 提高了小区播种质量。

(2) 搭建了室内试验台, 以锥体格盘转速、分种器转速为试验因素进行台架试验。试验表明, 该系统运行稳定、可靠, 能够满足小区排种作业要求。锥体格盘转速、分种器转速和两者之间交互作用对行间均匀性均具有非常显著的影响。

(3) 试验分析得出, 小区排种较优的作业参数为锥体格盘转速 4 r/min、分种器转速 1 250 r/min, 此时行间均匀性变异系数均值为 4.53%, 各行种管之间的行间一致性较好, 籽粒破碎率较低。

## 参 考 文 献

- [1] 佟超. 我国农业试验区播种机械的研究与发展[J]. 农业机械学报, 1995, 26(1): 125 - 126.
- [2] 谷金龙. 2BXJ-4 型大豆小区育种精量播种机的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.  
GU Jinlong. Study on 2BXJ-4 precision seeder for plot-soybean breeding[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [3] 尚书旗, 杨然兵, 殷元元, 等. 国际田间试验机械的发展现状及展望[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 5 - 8.  
SHANG Shuqi, YANG Ranbing, YIN Yuanyuan, et al. Current situation and development trend of mechanization of field experiments[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 1): 5 - 8. (in Chinese)
- [4] 戴飞, 赵武云, 韩正晟, 等. 4GX-100 型小区小麦种子收获机改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 196 - 202.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, HAN Zhengsheng, et al. Improvement and experiment on 4GX-100 type wheat harvester for breeding plots[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 196 - 202. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2016s030&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s030&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.030. (in Chinese)
- [5] COPP L G L, LAWSON J M. Cone seeders for small plots[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1970, 13(1): 204 - 207.
- [6] LIAN Zhengguo, WANG Jiangang, YANG Zhaohui, et al. Development of plot-sowing mechanization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 28(Supp. 2): 140 - 145.
- [7] 卢秉福, 胡志超, 张祖立. 作物育种试验区机械化的研究进展[J]. 中国农机化, 2006, 27(6): 44 - 47.  
LU Bingfu, HU Zhichao, ZHANG Zuli. Review on mechanization of crop breeding test plot[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2006, 27(6): 44 - 47. (in Chinese)
- [8] WAEL M F. Development and performance evaluation of a plot seeder to suit some different certified seed production[D]. Egypt: Tanta University, 2017.
- [9] 刘业宇, 寿露露, 李东升, 等. 里下河小麦小区播种机功能创新研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(29): 194 - 196.

- LIU Yeyu, SHOU Lulu, LI Dongsheng, et al. Research on function innovation of wheat plot seeder in Lixia River[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(29):194-196. (in Chinese)
- [10] 刘曙光, 尚书旗, 杨然兵, 等. 小区播种机的发展分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(3):237-241.  
LIU Shuguang, SHANG Shuqi, YANG Ranbing, et al. Analysis of plot seeder development[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3):237-241. (in Chinese)
- [11] 杨松, 尹美贵, 张淑敏. 牧草种子在分种锥上的运动及分散均匀性试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(3):178-184.  
YANG Song, YIN Meigui, ZHANG Shumin. Experimental research of the grass seed motion distribution uniformity on distributor cone[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(3):178-184. (in Chinese)
- [12] 杨然兵, 张翔, 李建东, 等. 锥体帆布带式排种器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):6-13.  
YANG Ranbing, ZHANG Xiang, LI Jiandong, et al. Parameter optimization and experiment on cone canvas belt type seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3):6-13. (in Chinese)
- [13] 朱明, 陈海军, 李永磊. 中国种业机械化现状调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14):1-7.  
ZHU Ming, CHEN Haijun, LI Yonglei. Investigation and development analysis of seed industry mechanization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14):1-7. (in Chinese)
- [14] 蔡东明, 雷和涛, 许智英, 等. 我国自走式小区精量播种机概览及使用[J]. 农业机械, 2018(3):95-98.
- [15] 龚丽农, 员玉良, 尚书旗, 等. 小区播种机电控系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):122-126.  
GONG Linong, YUAN Yuliang, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment on electronic control system for plot seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):122-126. (in Chinese)
- [16] 张洋, 刘军, 严汉宇, 等. 精通 SM32F4: 库函数版[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [17] 郭斌. 基于 STM32 的高低温测试中电台设备的监测管理系统[J]. 电子世界, 2018(19):35-36.
- [18] 陈文强. 简析 PWM 在电机控制系统的应用[J]. 机电技术, 2017(1):43-45, 53.
- [19] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 GPS 测速的电驱玉米精量播种机控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8):42-49.  
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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180805&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180805&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.005. (in Chinese)
- [20] 张春岭, 吴荣, 陈黎卿. 电控玉米排种系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2):51-59.  
ZHANG Chunling, WU Rong, CHEN Liqing. Design and test of electronic control seeding system for maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):51-59. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170207&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170207&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.007. (in Chinese)
- [21] 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/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10):145-153.  
YANG Shuo, WANG Xiu, ZHAI Changyuan, et al. Design and test on variable rate fertilization system supporting seeding and fertilizing monitoring[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):145-153. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181016&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181016&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.016. (in Chinese)
- [22] 姬江涛, 李明勇, 金鑫, 等. 基于 Android 系统的蔬菜智能耕作装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8):33-41, 118.  
JI Jiangtao, LI Mingyong, JIN Xin, et al. Design and experiment of intelligent farming device for vegetables based on Android [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):33-41, 118. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180804&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180804&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.004. (in Chinese)
- [23] 李国梁, 尚书旗, 王东伟, 等. 小区条播机离心分种装置的试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(3):213-217.  
LI Guoliang, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Test study on centrifugal distribution device of plot drill[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3):213-217. (in Chinese)
- [24] 刘曙光. 小区育种播种机关键装置的设计与机理分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011.  
LIU Shuguang. Study on design and mechanism analysis of main parts of plot seeder[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011. (in Chinese)

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.004

# 基于 CBR 的机械式大豆排种器设计重用技术

刘宏新 周兴宇 贾 儒 付露露

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为缩短机械式大豆排种器设计周期,降低设计成本,研究了机械式大豆排种器设计重用技术。运用物元模型表示排种器设计知识,构建排种器实例物元数据库,并与排种器参数化模型库共同组成排种器实例库;将排种器实例属性划分为基本参数、匹配参数和评价参数,通过基本参数的匹配缩小检索范围,利用改进的最近邻算法计算匹配参数和评价参数的相似度,实现相似实例的快速检索;利用规则关联的方法建立设计需求与排种器参数化模型主驱动参数间变换关系,通过对模型主驱动参数的调整实现实例的修改;采用 Visual Basic 语言、结合计算机辅助三维交互应用(Computer aided three-dimensional interactive application, CATIA)软件实现机械式大豆排种器交互式设计重用,运用工程离散元方法(Engineering discrete element method, EDEM)对重用排种器进行虚拟仿真,根据仿真分析结果提出改进意见,并对改进后的排种器进行仿真验证与台架试验。结果表明,改进后的排种器作业性能得到了提高,验证了该设计重用技术的可行性和有效性,可为农机装备的智能化设计研究提供技术借鉴。

**关键词:** 机械式排种器;设计重用;实例推理;物元;EDEM 仿真

**中图分类号:** S223.2; TP311.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0039-12

## Design and Reuse Technology of Mechanical Soybean Seed-metering Device Based on CBR

LIU Hongxin ZHOU Xingyu JIA Ru FU Lulu

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to reuse the design knowledge of mechanical soybean seed metering device, shorten the design cycle and reduce the design cost, the design reuse technology of mechanical soybean metering device was studied. It's difficult to describe the design knowledge qualitatively and quantitatively of the traditional knowledge representation method of case-based reasoning (CBR), such as frame representation, semantic network representation, predicate logic representation and so on. In order to realize the visualization, standardization and unification of design knowledge, the product design knowledge was described in the form of case matter element which contained case name, characteristic attribute and measure value. The method was beneficial to the effective use of design knowledge. In order to facilitate case storage and retrieval, the organization structure and case creation method of the design reuse were studied, Classification of basic hierarchy by seed-metering device category, and a case base was constructed which case model was corresponding to the case matter element, and some case relational matter elements were contained in the case base. This kind of organization structure was beneficial to the retrieval and reuse of examples, which made the restorage of cases follow the rules and provided convenience for the management and maintenance of the case library. At the same time, the components of the products were no longer isolated individuals, which fully reflected the overall characteristics of the products. In order to quickly retrieve the instance that met the design requirements from the case library, the characteristic property parameters of the instance were divided into basic parameters, matching parameters and evaluation parameters. The retrieval range can be reduced to a specific type and operation speed of seed metering device for retrieval by the selection of basic parameters. Similarity of cases was calculated by using improved nearest neighbor algorithm. The weight of the attributes of an instance can be determined by expert scoring or analytic hierarchy process (AHP) method, which can reduce the

收稿日期: 2018-12-21 修回日期: 2019-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700100)

作者简介: 刘宏新(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事农机数字化设计与数字资源管理研究, E-mail: Lcc98@neau.edu.cn