doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.006

弧齿往复式稻田株间自动避苗除草装置设计与试验

王　奇[1]　周文琪[1]　唐　汉[1]　马骁驰[1]　王金武[1]　佟　童[2]

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 黑龙江省农业机械工程科学研究院佳木斯农业机械化研究所, 佳木斯 154000)

摘要: 针对现有稻田株间除草漏除率大、除草率低和除草装置因无法确定秧苗位置而导致伤苗率高等问题,基于除草执行部件往复式开合运动思想,设计了一种用于去除稻田中耕期株间杂草的弧齿式自动避苗除草装置。根据中耕除草期稻株生长状态,通过理论分析设计了对置株间除草齿,并确定了除草弧齿的主要结构参数。利用光电传感器和电动直线推杆的协同作用,设计了自动避苗控制系统,当该装置执行避苗除草作业时,系统根据前进速度控制除草弧齿张开一定间距,以躲避秧苗。基于显式动力学仿真软件 LS-DYNA 进行了虚拟试验,以地表下 0 ~ 40 mm 内土壤扰动率为试验指标,当除草齿入土深度为 32 mm 时,土壤扰动率达到最大值,为 90.02%。通过田间试验验证了该株间除草装置和自动避苗控制系统的作业性能,在前进速度为 0.5 ~ 0.9 m/s 时,该装置平均除草率为 86.51%、平均伤苗率为 0.20%,除草和避苗作业性能稳定,可满足稻田除草农艺要求和株间"避苗除草"作业要求。

关键词: 稻田; 避苗除草装置; 株间杂草; 自动控制; 有限元法; 试验

中图分类号: S224.1+5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0053-09　　**OSID**:

Design and Experiment of Arc-tooth Reciprocating Motion Type Seedling Avoided Weeding Control Device for Intertillage Paddy

WANG Qi[1]　ZHOU Wenqi[1]　TANG Han[1]　MA Xiaochi[1]　WANG Jinwu[1]　TONG Tong[2]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Jiamusi Institute of Agricultural Mechanization*, *Heilongjiang Academy of Agricultural Machinery Engineering Science*, *Jiamusi* 154000, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of high missed weeding rate and low weeding rate between plants in paddy fields, and the existing weeding device cannot determine the position of the seedlings and led to the high seedling damage rate, an arc-tooth type automatic seedling avoided weeding device was designed to remove weeds between plants during paddy field cultivation, which was based on the idea of controlling the intermittent opening and closing movement of the weeding execution component. According to the growth status of rice plants in the weeding period of intertillage, the symmetrical weeding teeth used to remove weeds between plants were designed through theoretical analysis, and the main structural parameters of arc-shaped weeding teeth were determined. The automatic control system for avoiding seedlings was designed through the synergy of photoelectric sensors and electric linear actuators. When the weeding device needed to perform the action of avoiding seedlings, the control system controlled the arc-shaped weeding teeth to open a certain distance according to the real-time monitoring of the forward speed to avoid the seedlings. A virtual experiment was carried out based on the dynamic simulation software LS-DYNA. In the experiment, the soil disturbance rate within 0 ~ 40 mm below the ground surface was used as the evaluation index, and the working depth of the arc-shaped weeding tooth of the device was determined to be 32 mm, and at this time, the soil disturbance rate reached the maximum value, which was 90.02%. The operating performance of the inter-plant weeding device and automatic seedling avoidance control system was verified through field experiment. When the forward speed was 0.5 ~

收稿日期: 2021-03-25　修回日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875098)、国家现代农业产业技术体系岗位科学家项目(CARS-01-44)和黑龙江省现代农业产业技术协同创新体系岗位专家项目

作者简介: 王奇(1990—),男,讲师,博士,主要从事保护性耕作技术及其智能农业装备研究,E-mail: wangqi_4034@163.com

通信作者: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwuw@163.com

0.9 m/s, the average weeding rate of the device was 86.51% and the average seedling damage rate was 0.20%. The performance of weeding and seedling avoidance was stable, and the operation quality can meet the agronomic requirements of paddy field weeding and the operation requirements of "avoiding seedlings and weeding" between plants.

Key words: paddy field; seedling avoidable weeding device; interplant weeds; automatic control; finite element method; experiments

0 引言

有机农业要求种植业在生产中完全或基本不施用人工合成的肥料、农药和除草剂,具有提高土壤肥力、增加土壤微生物种类和数量、降低资源浪费和环境污染等优点[1-7],这也对农田除草作业提出了更高要求[8]。机械除草是实现有机农业的有效技术措施,近年来水稻行间除草技术与装备得到广泛研究和应用,并取得了较好的效果[9-14]。由于水稻植株特性及水田环境的复杂性,使稻田株间杂草难以采用机械方式去除[15],因此影响了水稻植株生长,降低了水稻产量和品质[16-18]。

按照结构形式,水稻株间被动机械除草装置可分为对转式、固定弹齿式和弹性耙齿式[19-22]。除草装置根据除草期水稻和杂草根系物理特性差异,合理配置关键部件作业深度,被动去除株间杂草,但在苗带范围内均存在漏除现象,通常漏除区域为稻苗两侧 6~10 cm。吴崇友等[14]研究的主动摆动除草刀齿和王金武等[23-24]研究的主动式螺旋弹齿株间除草盘,通过关键部件的主动往复摆动和回转能够实现株间全幅除草,但是均不具备对植株的识别和定位功能,存在伤苗现象。为了降低机械除草造成的伤苗率,机械视觉和自动控制等技术和方法已应用于中耕除草装备中[25-27],但相关研究主要集中在基于作物行的视觉导航方面,单一的自动控制需要较理想的作业环境才能实现精准避障,目前鲜见根据稻株位置精确控制除草工作部件而进行株间除草作业的研究。文献[28]研制了一种基于机械视觉的气动式除草装置,具有较好的作业效果,但该装置依赖视觉智能导航平台,其结构较为复杂,作业效率有待提高。

本文设计一种不依托于智能导航平台的稻田株间避苗除草装置,根据中耕期水稻植株和杂草物理特性,结合机械结构设计与电控技术,通过理论分析和虚拟仿真试验设计一种基于往复式开合运动的对置弧齿式稻田株间避苗除草装置,通过田间试验验证其作业性能,以期为该装置的进一步优化提供依据。

1 整体结构与工作原理

弧齿式稻田株间自动避苗除草装置的结构如图 1 所示,由安装架、株间除草弧齿、株侧除草弧齿、除草齿固定架、弧齿控制连接板和避苗自动控制系统组成,其中避苗自动控制系统包括光电传感器、传感器固定架、电动直线推杆和避苗控制器等。光电传感器通过传感器固定架安装在安装架前侧,为植株定位检测元件。电动直线推杆通过螺栓固装在除草齿固定架上,并由除草齿固定架安装在安装架后侧,为控制除草弧齿开闭的执行元件。株间除草弧齿与除草齿固定架铰接,弧齿控制连接板的两端分别与电动直线推杆伸缩端和两对置株间除草弧齿铰接。光电传感器和电动直线推杆沿机组前进方向前后排布,避苗控制器固定安装在机架上。

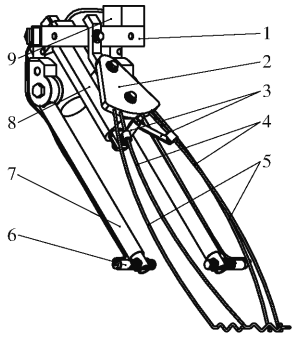

图 1 稻田株间自动避苗除草装置结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of seedling avoided weeding control device

1. 安装架 2. 除草齿固定架 3. 弧齿控制连接板 4. 株间除草弧齿 5. 株侧除草弧齿 6. 光电传感器 7. 传感器调节固定架 8. 电动直线推杆 9. 避苗控制器

该装置由插秧机机头提供动力,通过机架挂接在三点悬挂架上,沿插秧机前进方向运动。作业前,通过调节机架上限深装置使除草弧齿在设定的入土深度下运行,启动避苗除草控制系统,并通过避苗控制器按键模块设置系统的控制精度和株间除草齿张开最大间距等信息。作业时,该装置随着插秧机头的前进方向运动,避苗控制器中的 GPS 模块监测机具的作业速度,光电传感器处于常开状态监测水稻植株位置,当行进方向上出现秧苗遮挡光电传感器接收端接收光线时,微控制器结合机具当前作业速度实时调控电动直线推杆运行速度,并依次做出相应伸长和收缩动作,通过弧齿控制连接板传递动力使株间除草齿末端间歇性张开一定间距,以躲避秧苗和恢复株间除草状态,完成株间避苗除草作业。

除草弧齿在机具的拉力作用下在杂草根系生长层内向前被动移动，利用波纹段弧齿末端增加其对土壤的扫掠面积和扰动量，将杂草剥离土壤，并使之漂浮于水面。株间除草齿和株侧除草齿共同形成封闭除草区域，去除常规行间除草漏除区域杂草，实现株间避苗除草。

2　关键部件及参数设计

2.1　稻田株间除草作业条件

综合文献[11]和实际测定数据，得黑龙江省常规种植稻苗株距为 100 ~ 150 mm，行距 D 为 300 mm，插秧深度 h_1 为 15 ~ 20 mm，中耕除草期稻苗地上茎秆穴直径 d_1 为 35 ~ 40 mm、高度 h 为 200 ~ 250 mm、茎叶最大围度 d_2 为 80 ~ 100 mm、根部分布深度 h_2 为地表以下 20 ~ 100 mm。行间除草装置作业幅宽 D_r 为 180 ~ 200 mm[9-14]。稻田株间除草作业条件如图 2 所示。

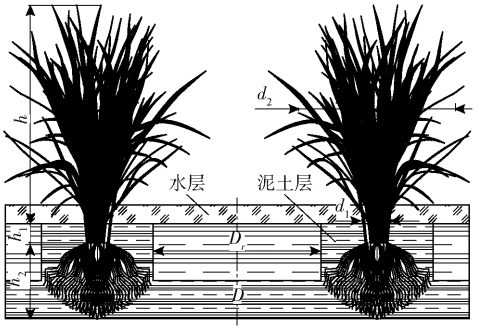

图 2　稻田株间除草作业条件示意图

Fig. 2　Schematic of weeding operation conditions in paddy fields

2.2　除草齿参数确定

除草齿是该装置的关键工作部件，其设计要求是入土部分应尽量避免或减小漏除区域，形成完整株间除草区域，同时其地上部分应避免在作业过程中碰触损坏秧苗茎叶，降低伤苗率。为了减小除草齿行程，提高自动避苗控制系统响应速度，将除草齿设计为株间弧齿和株侧弧齿，通过控制系统调控株间弧齿张开或闭合实现植株根部区域杂草清除，通过株侧弧齿去除行间除草轮与株间弧齿作业后所遗留部分杂草，主要结构如图 3 所示。

株间除草齿由入土和地上两部分组成。根据滑切原理，当农业机械工作部件滑切角超过金属对土壤的摩擦角(23° ~ 45°)时，可降低作业阻力[29-30]，基于此设计除草齿部分结构参数。由于杂草根系在泥土层主要分布在 0 ~ 40 mm 范围内，为使除草齿作业过程中具有更大的扫掠面积，将入土部分除草齿设计为波纹形态。为了避免两对置株间除草齿在未避苗作业状态下出现漏除区域，将其末端进行交错重叠设计。地表以上部分除草齿主要用于连接机架和入土部分除草齿，其在作业过程中应避免对秧苗造成接触损伤，并且应使装置结构紧凑，便于加工。株侧除草齿设计原则与株间除草齿相同。特别地，株间除草齿在避苗过程中其末端需张开 40 mm，则株间除草齿由图 3 中位置Ⅰ移动到位置Ⅱ，株侧除草齿应避免干扰株间除草齿往复运动。

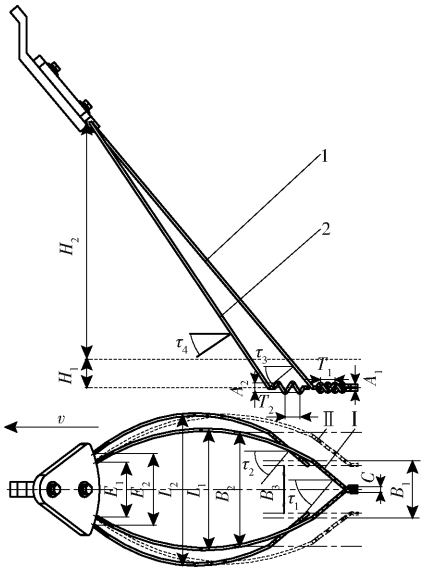

图 3　除草弧齿结构示意图

Fig. 3　Structural diagram of weeding arc-tooth

1. 株间除草齿　2. 株侧除草齿

综合上述分析，确定株间除草齿主要参数：作业区间为稻株两侧 0 ~ 30 mm，幅宽 B_1 为 60 mm、重叠区间 C 为 6 mm，入土部分滑切角 τ_1 为 50°，地上部分滑切角 τ_2 为 40°，入土部分波纹幅值 A_1 为 10 mm、周期 T_1 为 20 mm，地上部分顶端离地距离 H_2 为 250 mm、顶端间距 E_1 为 60 mm、最大间距 L_1 为 125 mm；株侧除草齿主要参数：作业区间为稻株两侧 25 ~ 60 mm，幅宽 B_2 为 120 mm，入土部分滑切角 τ_3 为 50°、地上部分滑切角 τ_4 为 35°，入土部分波纹幅值 A_2 为 12.5 mm、周期 T_2 为 20 mm，地上部分顶端离地距离 H_2 为 250 mm、顶端间距 E_2 为 75 mm、最大间距 L_2 为 155 mm。将各部分关键点进行圆滑过渡形成除草弧齿，则株间除草装置作业总幅宽为 120 mm。

3　自动避苗控制系统设计

该装置主要应用于中耕期的水稻，系统利用植株和杂草高度差检测植株位置，传感器的安装高度可以检测到水稻植株，而不会检测杂草，再通过控制器根据机组前进速度实时控制电动直线推杆伸缩量，进而调控除草弧齿开合，实现避苗作业。系统硬件由光电传感器、电动直线推杆和控制器等组成，自动避苗控制系统结构如图 4 所示。

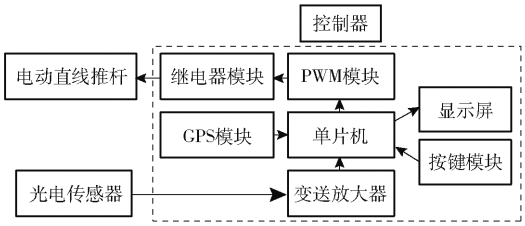

图 4 自动避苗控制系统结构框图

Fig. 4 Structure frame diagram of seedling avoided weeding control system

3.1 系统硬件

系统主要硬件原理如图 5 所示,微控制器采用 STM32F103ZET6 单片机,其工作频率可达 72 MHz,I/O 口及内部资源丰富,满足设计需求;标号 U1 和 U3 是电源转换模块,分别采用 LM7805 和 LM1117 - 3.3 芯片,用以将作业机具电瓶提供的 12 V 电源转换为系统中各模块需要的 5 V 或 3.3 V 电源;标号 P2 为光电传感器,其信号输出端通过串联两个电阻实现分压后与单片机 PA1 引脚连接,确保输入单片机的电压信号在规定范围内;标号 SD CARD 是 SD 卡存储模块,利用 SD 卡作为存储媒介存储作业信息,其为 SPI 通信模式,该模块的 1、2、5、7 引脚分别与单片机支持 SPI 模式的 4 个引脚连接;标号 U5B 为 PWM 功率放大模块,可将单片机输出的 PWM 信号放大,驱动 12 V 规格的电动直线推杆,其输出端 OUT 为继电器模块 K1 和 K2 的信号输入端。单片机通过控制 PA7 口和 PA8 口输出不同高低电平,使继电器模块 K1 和 K2 分别动作,实现电动推杆的伸缩变换。电动直线推杆的运行速度通过 PWM 信号调制予以控制。标号 P4 为 GPS 模块,其 TX、RX 接

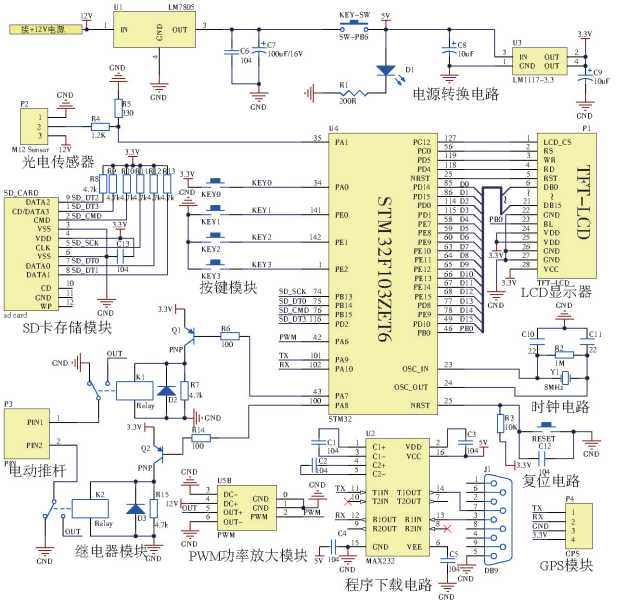

图 5 自动避苗控制系统硬件框图

Fig. 5 Hardware frame diagram of seedling avoided weeding control system

口与单片机相应串口相连;标号 P1 为 LCD 显示模块,标号 KEY0 ~ KEY3 为按键模块,二者共同实现人机交互功能。

采用的光电传感器为激光对射型,型号为 M12JG - 30N1,由乐清贝福电器有限公司生产,640 ~ 650 nm 红色可见激光,工作电压为6 ~ 36 V DC,工作电流为 100 ~ 200 mA;采用的电动直线推杆为上海达铁机电科技有限公司生产的TA2 - B 通用型直流电动推杆,工作电压为 12 V DC,行程为 100 mm,运行速度为 60 mm/s,推力可达100 N。自动避苗控制系统实物如图 6 所示。

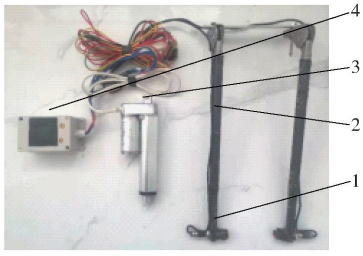

图 6 自动避苗控制系统实物图

Fig. 6 Picture of seedling avoided weeding control system

1. 光电传感器 2. 传感器调节固定架 3. 直线电动推杆 4. 避苗控制器

3.2 系统程序

系统软件设计流程如图 7 所示。首先,初始化系统 I/O 端口、定时器和 PWM 等寄存器,并利用按键模块设置系统的控制精度和株间除草弧齿张开间距等信息。随后系统开始作业,GPS 模块监测机具的作业速度,光电传感器监测水稻植株位置。当传感器监测到植株位置信号时,单片机根据机具作业速度得出电动直线推杆延时时长和运行速度,利用 PWM 信号调制实时调节电动直线推杆运行速度,再控制继电器模块 1 动作,使电动推杆伸长,弧齿展开;随后,单片机控制继电器模块 2 动作,使电动推杆收缩,弧齿闭合,从而实现株间避苗除草。LCD 显示器实时显示系统的作业速度、稻株穴数等相关作业状态,存储模块在每次作业完成后存储作业数据。

3.3 避苗运动过程分析

光电传感器和 GPS 模块首先检测秧苗位置和实时前进速度,随后由控制器控制电动直线推杆驱动株间除草弧齿进行开闭运动,执行避苗动作。如图 8 所示,光电传感器与株间除草齿末端间距与水稻株距相等,当传感器未检测到前方新秧苗时,电动直线推杆驱动株间除草齿在位置Ⅰ处执行上一命令逐渐张开;当传感器到达并检测到前方新植株时,单片机将电动直线推杆延时信号发出,同时电动直线推杆驱动株间除草齿经过植株穴径最大位置Ⅱ处;

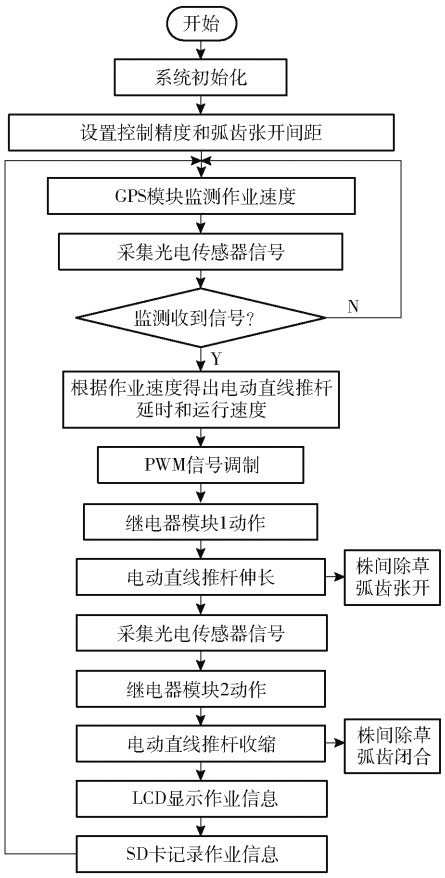

图 7　自动避苗控制系统工作流程图

Fig. 7　Working flow chart of seedling avoided weeding control system

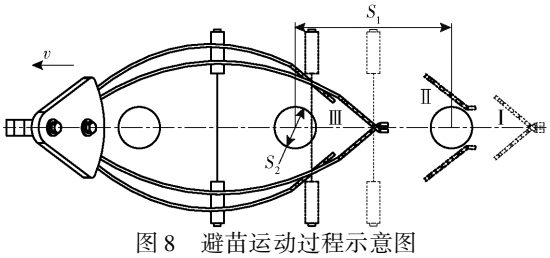

图 8　避苗运动过程示意图

Fig. 8　Schematic of seedling avoided weeding movement

随后电动直线推杆驱动株间除草齿株间闭合到达位置Ⅲ处，并根据收到的延时信号开始下一周期动作；在一个完整避苗运动周期内，单片机向电动直线推杆发送一次延时和动作信号，以消除田间干扰信息对除草齿动作影响。因此，根据水稻种植株距和所选用光电传感器参数，确定单片机通过 PWM 模块和继电器模块控制电动直线推杆延时运行时间应满足

$$\Delta t = \frac{S_1 + S_2}{2v} - 0.02 \tag{1}$$

式中　Δt——电动直线推杆延时运行时间，s

S_1——理论株距，m

S_2——理论稻株穴径，m

v——机组瞬时速度，m/s

电动直线推杆伸缩控制株间除草齿在避苗过程中的开闭运动，在实际作业过程中应根据前进速度的变化实时调整电动直线推杆的伸缩速度，从而避免两株间除草齿开闭时间过早或过晚，造成接触损伤稻株或增加漏除面积等现象。因此，根据除草作业要求和选用的电动直线推杆参数，设定电动直线推杆最大伸缩量为 5 mm，连接杆长度为 40 mm，且电动直线推杆运行速度与机组前进速度之间满足

$$v_E = 0.01v + 0.02 \tag{2}$$

式中　v_E——电动直线推杆运行速度，m/s

此时株间除草齿末端张开最大间距为 40 mm，该装置在植株两侧各 60 mm 株间除草范围内，理论除草覆盖率为 86.94%，配合行间除草装置作业后全幅除草覆盖率为 94.47%。当除草装置的前进速度小于 0.9 m/s 时，该系统均满足株间除草要求。株间除草齿运动掠过一个作业周期的区域如图 9 所示。

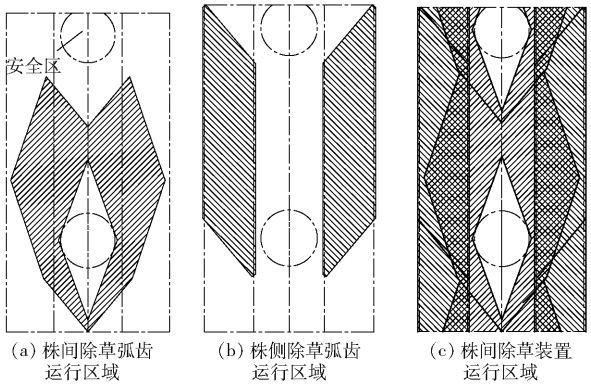

图 9　自动避苗除草装置扫掠区域图

Fig. 9　Sweep area diagrams of seedling avoided weeding control device

4　试验与结果分析

4.1　虚拟仿真试验

为了验证株间除草装置设计的合理性，采用显式动力学软件 LS-DYNA 建立株间除草齿-水-土壤流固耦合模型，模拟田间作业环境，对装置土壤扰动情况进行考察。

4.1.1　模型建立

运用 Creo 软件对株间除草齿进行三维建模和仿真简化处理，并以. stp 格式导入 hypermesh 软件中，采用六面体网格单元形式进行网格划分，如图 10 所示，再将生成的 k 文件导入 LS-DYNA 前后处理软件 LS-PrePost 中。株间除草齿材料定义为 MAT_RIGID，相关参数设置为：密度 0.007 82 g/mm^3，弹性模量 2.11 × 10^5 MPa，泊松比 0.288[31]。

为模拟株间除草装置实际水土耦合田间作业状态，运用 LS-DYNA 前后处理软件 LS-PrePost 分别

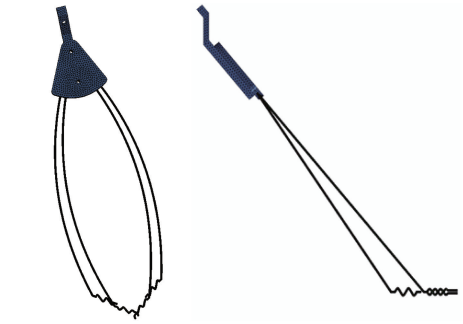

图 10 株间除草弧齿网格划分几何模型

Fig. 10 Geometric model of meshing of weeding arc-tooth

建立水层模型和土层模型,并将水层模型建立在土层模型正上方,通过节点重合命令将 2 层模型的节点重合,形成水上土下的水-土耦合模型,如图 11 所示。根据农艺要求建立水层模型尺寸(长 × 宽 × 高)为 650 mm × 300 mm × 30 mm,土层模型尺寸(长 × 宽 × 高)为 650 mm × 300 mm × 60 mm。土层材料定义为 MAT_FHWA_SOIL,相关参数设置为:土壤密度 0.001 61 g/mm^3,土粒密度 0.002 73 g/mm^3,体积模量 5.6 MPa,剪切模量 1.9 MPa,黏聚力 0.015 5 MPa,内摩擦角 15°,含水率 40%[32],其他参数的选取参考 MAT147 试验值[33]。水层材料定义为 MAT_NULL,相关参数设置为:密度为 0.001 g/mm^3,截止压力为 -1×10^5 MPa,并定义 EOS 状态方程用以设定土层和空气的材料参数。采用多物质 ALE 单元算法 SOLID 网格单元定义水层网格和土层网格单元类型。采用多物质耦合关键字 ALE_MULTI_MATERIAL_GROUP 设定模型,以实现水-土在模型中相互混合。对水-土耦合模型施加重力约束,采用 BOUNDARY_NON_REFLECTING 关键字对水土表面进行约束,并对土壤底层施加 SPC 全约束。最后采用 CONTROL_ALE 关键字对 ALE 网格进行光滑化激活。

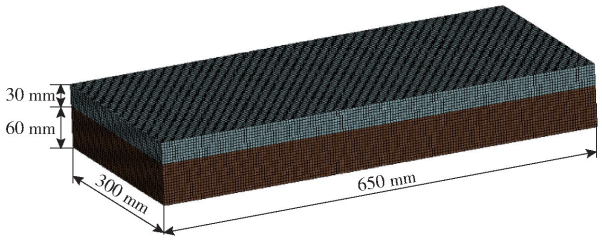

图 11 虚拟水-土壤耦合模型

Fig. 11 Virtual composite model of water – soil

仿真过程如图 12 所示。将除草弧齿运动简化为匀速直线运动和周期性匀速圆周运动,采用 CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE 关键字对株间除草弧齿和除草齿固定架创建铰链约束,运用 DEFINE_CURVE 和 BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID 关键字定义和调用上述运动速度曲线。设置 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 流固耦合关键字命令,并将 ALE 单元体(水-土耦合模型)和拉格朗日单元体(株间除草装置模型)分别定义为主结构 MASTER 和从结构 SLAVE,采用罚耦合算法进行流固耦合仿真。

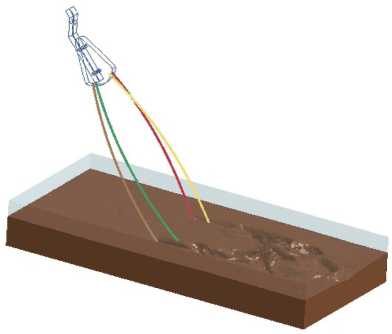

图 12 除草装置与水-土壤流固耦合仿真过程

Fig. 12 Simulation of fluid-solid coupling between weeding arc-tooth and water – soil

4.1.2 试验方案

除草齿入土深度是影响该装置除草效果的主要因素,因此,为了获得合理的入土深度进行单因素虚拟仿真试验,考察该装置在其作业幅宽内不同土层土壤扰动率变化情况,土壤扰动率为规定体积内受破坏导致密度下降的土壤单元数与土壤复合模型总单元数的比值[34]。试验中,根据株间除草装置实际作业情况,设前进速度为 0.8 m/s,入土深度分别设置为 8、16、24、32、40 mm。每组试验后,利用后处理软件 LS – PrePost 获取土壤单元密度分布和数据导出,如图 13 所示,再通过 Excel 软件进行数据处理。每个入土深度水平重复 3 次试验,处理结果取平均值记为试验结果。

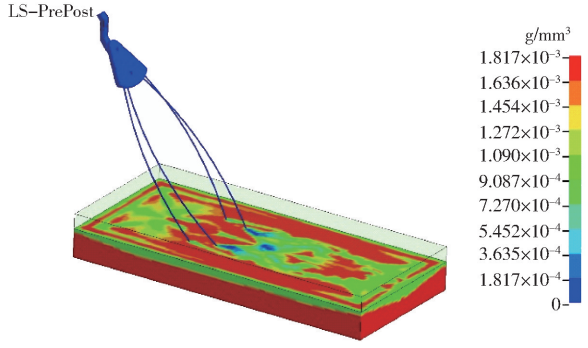

图 13 密度分布示意图

Fig. 13 Schematic of density distribution

4.1.3 试验结果

运用 SPSS 软件处理试验数据,进行方差分析和 F 检验,试验结果如图 14 所示,各水平数据平均值后不同字母表示同一处理间差异显著($P < 0.05$)。

由图 14 可知,入土深度对土壤扰动率具有显著性影响($P < 0.05$)。当入土深度增加时,0 ~ 40 mm

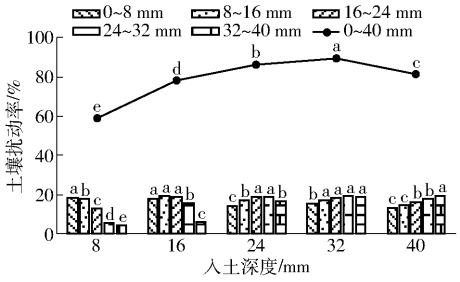

图 14　除草齿入土深度对不同土层土壤扰动率的影响

Fig. 14　Effect of arc-tooth working depth on soil disturbance rate

土层内土壤扰动率先升高后下降，在入土深度为 32 mm 时达到最大值，总扰动率为 90.02%，此时在地表以下 0 ~ 8 mm、8 ~ 16 mm、16 ~ 24 mm、24 ~ 32 mm 和 32 ~ 40 mm 内土层的扰动率分别为 79.05%、86.45%、91.85%、96.10% 和 94.15%。产生此现象的原因可能是除草齿入土部分为波纹结构，其在竖直方向有效扰动区间小于考察的杂草根系生长深度范围，使得在设置的作业深度水平下除草齿有效扰动区间内的土壤扰动率更高；靠近除草齿有效扰动区间的泥土，在相互之间粘连作用下得到扰动，但扰动能力有限，使得除草齿有效扰动区间下方土壤扰动率下降显著；波纹形除草齿在指定深度内滑动，增加了有效扰动区间上方土壤在竖直方向的相互作用和运动，但越远离除草齿有效扰动区的土层土壤扰动率越低。基于上述分析，确定除草齿入土深度为 32 mm。

4.2　田间验证试验

为验证弧齿式稻田株间自动避苗除草装置在田间作业时工作性能，于 2020 年 6 月 24 日—7 月 1 日在东北农业大学阿城水稻试验示范区进行田间试验。试验期间平均气温 20 ~ 25℃，无降雨。试验田水层深度为 20 ~ 30 mm，泥脚深度为 160 ~ 180 mm。水稻秧苗平均高度为 220 ~ 250 mm，行距为 300 mm，株距为 150 mm。试验区杂草主要种类有稗草和野慈菇，平均杂草密度为 35 株/m^2。

该装置由南通富来威农业装备有限公司加工试制，通过三点悬挂架与插秧机机头相连。试验前，调节机器限深装置控制该装置作业深度为 32 mm。试验时控制插秧机前进速度为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 m/s，评价指标为除草率和伤苗率。田间试验现场如图 15 所示。

试验时，以 15 m 作为一个试验区长度，设置试验区前后各 5 m 区域为缓冲区用于机器启停缓冲。除草率统计方法为在试验区内沿机器前进方向选取 10 个测试小区，测试小区大小为 0.12 m（除草装置理论作业幅宽）×1 m，每个测试小区间间隔 0.5 m。



图 15　田间试验现场

Fig. 15　Field experiment scene

记录作业前后每个测试小区内杂草总数和除掉杂草数，除草率即为除掉杂草数与杂草总数之比，其中测试小区内杂草根茎被拉断、翻埋、漂起定义为已除杂草；杂草根与泥面相连接，可以继续生长定义为未除杂草。伤苗率统计方法为记录试验前后试验区测试行内总秧苗数和损伤秧苗数，伤苗率即为损伤秧苗数与总秧苗数之比，其中试验区内秧苗被压折叶片、连根拔起和倒伏定义为损伤秧苗[11-12]。每组水平试验重复 3 次，测试结果取平均值作为试验结果。田间试验结果如表 1 所示。

表 1　田间试验结果

Tab. 1　Test results

前进速度/(m·s^{-1})	除草率/%	伤苗率/%
0.5	81.74	0
0.6	83.33	0
0.7	86.51	0.33
0.8	88.89	0
0.9	92.07	0.67
平均值	86.51	0.20

由表 1 可知，自动避苗株间除草装置的平均除草率为 86.51%，平均伤苗率为 0.20%，且前进速度对除草率具有显著影响（$P < 0.05$），除草率随着前进速度增加而升高。产生此现象的原因可能是随着前进速度的增大，除草齿与土壤和杂草根系间的相互作用也增加，提高了其对杂草根系在泥土中的扰动和剥离能力，从而使除草率升高；自动避苗控制系统在试验前进速度范围内均能控制株间除草弧齿有效躲避秧苗，在不同速度水平下伤苗率变化不显著，验证了程序设计的合理性。对比田间试验与仿真试验结果可知，土壤扰动率可用于表征除草率，土壤扰动率越高则除草效果越好，同时验证了仿真试验的可行性。田间试验结果表明，稻田株间自动避苗除草装置除草作业性能良好，自动避苗系统运行稳定，作业质量满足水田中耕除草农艺要求。

5 结论

(1)设计了一种稻田株间自动避苗除草装置,该装置能够有效清除稻田株间杂草,其除草率高、伤苗率低,作业性能稳定,可满足稻田除草作业要求。

(2)根据中耕期稻株物理参数,通过理论分析将除草齿设计为株间除草弧齿和株侧除草弧齿,确定了除草齿主要结构参数,其除草作业区域分别为稻株两侧 0 ~ 30 mm 和 25 ~ 60 mm,株间除草总幅宽为 120 mm。

(3)利用光电传感器和电动直线推杆的协同作用,设计了一种自动避苗控制系统,通过光电传感器检测稻苗位置,根据植株监测瞬时前进速度,实时调节电动直线推杆运行延时和运行速度,从而控制株间除草齿张开设定间距,以躲避秧苗,配合行间除草装置作业全幅除草覆盖率可达 94.47%。

(4)利用显式动力学软件 LS-DYNA 进行虚拟仿真试验,确定了土壤扰动率最大时的除草齿入土深度为 32 mm。田间试验表明,稻田株间自动避苗除草装置平均除草率为 86.51%、平均伤苗率为 0.20%,除草和避苗作业性能稳定,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] FLIESBACH A, OBERHOLZER H R, GUNST L, et al. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007, 118(1-4): 273-284.

[2] MADER P, FLIESBACH A, DUBOIS D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. Science, 2002, 296(5573): 1694-1697.

[3] THIERFELDER C, WALL P C. Effects of conservation agriculture techniques on infiltration and soil water content in Zambia and Zimbabwe[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 217-227.

[4] SCIALABBA N, MÜLLER-LINDENLAUF M. Organic agriculture and climate change[J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2010, 25(2): 158-169.

[5] STALENGA J, KAWALEC A. Emission of greenhouse gases and soil organic matter balance in different farming systems[J]. International Agrophysics, 2008, 22(3): 287-290.

[6] 孙妮娜, 董文军, 王晓燕, 等. 东北稻区水稻收获秸秆处理方式综合效果研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 69-77.
SUN Nina, DONG Wenjun, WANG Xiaoyan, et al. Comprehensive effect of rice harvesting straw treatment methods in northeast rice region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 69-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200408&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.008. (in Chinese)

[7] 聂堂哲, 张忠学, 齐智娟, 等. 1960—2015 年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 279-290.
NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, QI Zhijuan, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rice water requirement in Heilongjiang Province during 1960—2015[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 279-290. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190532&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.032. (in Chinese)

[8] 马旭, 齐龙, 梁柏, 等. 水稻田间机械除草装备与技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 162-168.
MA Xu, QI Long, LIANG Bai, et al. Present status and prospects of mechanical weeding equipment and technology in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 162-168. (in Chinese)

[9] 王金峰, 高观保, 闫东伟, 等. 水田电动双行深施肥除草机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 46-57.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, YAN Dongwei, et al. Design and experiment of electric control double row deep fertilizing weeder in paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 46-57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180706&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.006. (in Chinese)

[10] 王金武, 李超, 李鑫, 等. 铺膜插秧后水田 3SCJ-1 型除草机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 102-109.
WANG Jinwu, LI Chao, LI Xin, et al. Design and experiment of 3SCJ-1 type weeding machine for paddy field applied to film mulching and transplanting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 102-109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180412&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.012. (in Chinese)

[11] 王金峰, 王金武, 闫东伟, 等. 3SCJ-2 型水田行间除草机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 71-78, 202.
WANG Jinfeng, WANG Jinwu, YAN Dongwei, et al. Design and experiment of 3SCJ-2 type row weeding machine for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 71-78, 202. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.009. (in Chinese)

[12] 齐龙, 赵柳霖, 马旭, 等. 3GY-1920 型宽幅水田中耕除草机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 47-55.

QI Long, ZHAO Liulin, MA Xu, et al. Design and test of 3GY－1920 wide-swath type weeding-cultivating machine for paddy [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 47－55. (in Chinese)

[13] 齐龙, 马旭, 谭祖庭, 等. 步进式水田中耕除草机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 31－35.
QI Long, MA Xu, TAN Zuting, et al. Development and experiment of marching-type inter-cultivation weeder for paddy[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 31－35. (in Chinese)

[14] 吴崇友, 张敏, 金诚谦, 等. 2BYS－6 型水田中耕除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 51－54.
WU Chongyou, ZHANG Min, JIN Chengqian, et al. Design and experiment of 2BYS－6 type paddy weeding-cultivating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 51－54. (in Chinese)

[15] 陶桂香, 王金武, 周文琪, 等. 水田株间除草机械除草机理研究与关键部件设计[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 57－63.
TAO Guixiang, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Herbicidal mechanism and key components design for paddy weeding device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 57－63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20151109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.009. (in Chinese)

[16] 徐正浩,谢国雄,周宇杰,等. 不同株型和化感作用特性水稻对 3 种稻田主要杂草的干扰控制作用[J]. 作物学报, 2013, 39(7): 1293－1302.
XU Zhenghao, XIE Guoxiong, ZHOU Yujie, et al. Interference of different morphological types and allelopathic rice materials with three principal paddy weeds[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(7): 1293－1302. (in Chinese)

[17] 吴尚, 张纪利, 李保同, 等. 千金子对水稻生长的影响及其经济阈值[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 469－478.
WU Shang, ZHANG Jili, LI Baotong, et al. Influence of leptochloa chinensis on the growth of paddy rice and its economic threshold[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(3): 469－478. (in Chinese)

[18] 张自常, 李永丰, 张彬, 等. 稗属杂草对水稻生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3177－3184.
ZHANG Zichang, LI Yongfeng, ZHANG Bin, et al. Influence of weeds in *echinochloa* on growth and yield of rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3177－3184. (in Chinese)

[19] 刘闯, 齐龙, 马旭, 等. 高效型水田行-株间同步机械除草装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(10):78－82.
LIU Chuang, QI Long, MA Xu, et al. Design and test of high efficiency mechanical weeding device for inter-row and intra-row synchronization in paddy field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(10):78－82. (in Chinese)

[20] 株式会社美善. 水田除草兼用溝切り機:2007105006[P]. 2007－04－26.

[21] 三菱農機株式会社,株式会社キュウホ－. 除草機:2007105006[P]. 2007－04－26.

[22] 權勝昭博. 水田の条間-株間同時除草機械[R]. 日本埼玉:生研機構·生産システム研究部,技術の窓,2008.

[23] 王金武, 牛春亮, 张春建, 等. 3ZS－150 型水稻中耕除草机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 75－79.
WANG Jinwu, NIU Chunliang, ZHANG Chunjian, et al. Design and experiment of 3ZS－150 paddy weeding-cultivating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 75－79. (in Chinese)

[24] 陈振歆, 王金武, 牛春亮, 等. 弹齿式苗间除草装置关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 81－86.
CHEN Zhenxin, WANG Jinwu, NIU Chunliang, et al. Design and experiment of key components of trash cultivator's working in paddy rice seeding lines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 81－86. (in Chinese)

[25] 胡炼, 罗锡文, 曾山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12－18.
HU Lian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12－18. (in Chinese)

[26] 陈学深, 黄柱健, 马旭, 等. 基于触觉感知的水稻行弯度测量装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 45－53.
CHEN Xueshen, HUANG Zhujian, MA Xu, et al. Design and experiment of tactile sensing device for measuring rice curvature [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 45－53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2002006&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.006. (in Chinese)

[27] 蒋郁, 崔宏伟, 区颖刚, 等. 基于茎基部分区边缘拟合的稻株定位方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 23－31, 49.
JIANG Yu, CUI Hongwei, OU Yinggang, et al. Positioning method of rice seedlings based on edge fitting in separated region of stem base[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 23－31, 49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170603&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.003. (in Chinese)

[28] 蒋郁, 齐龙, 龚浩, 等. 气动式水稻株间机械除草装置研制[J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(6): 37－49.
JIANG Yu, QI Long, GONG Hao, et al. Design and experiment of pneumatic paddy intra-row weeding device[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(6): 37－49. (in Chinese)

(下转第 72 页)

2020,42(8):158 - 166.
ZHANG Xin, LI Guanglin, BAI Qiuwei, et al. Design and test of a quantitative fertilizer discharge device with automatically adjustable volume of external groove wheel[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition),2020,42(8):158 - 166. (in Chinese)

[23] 王金武,王奇,唐汉,等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):112 - 117.
WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):112 - 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150916&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016. (in Chinese)

[24] 高观保. 风送式水稻侧深施肥装置关键部件设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
GAO Guanbao. Design and experiment of key parts of side-depth fertilizer device with pneumatic conveying for paddy[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2019. (in Chinese)

[25] 王永梅,杨宛章,王希贵. 螺旋槽轮式排种器的研究[J]. 新疆农业大学学报,2006,29(1):67 - 70.
WANG Yongmei, YANG Wanzhang, WANG Xigui. Study on row sowing device with spiral sheave[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University,2006,29(1):67 - 70. (in Chinese)

[26] 尹文庆,赵璐,李骅,等. 气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):68 - 76,136.
YIN Wenqing, ZHAO Lu, LI Hua, et al. Design and experiment on suction nozzle type hole of pneumatic-sheave combined vegetable precision metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):68 - 76,136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190408&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.008. (in Chinese)

[27] 李立伟,孟志军,王晓鸥,等. 气送式水稻施肥机输肥装置气固两相流仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):171 - 180.
LI Liwei, MENG Zhijun, WANG Xiaoou, et al. Simulation analysis of gas - solid two phase flow in pneumatic conveying fertilizer feeder of rice fertilizer applicator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):171 - 180. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s023&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.023. (in Chinese)

[28] 杨庆璐,李子涵,李洪文,等. 基于 CFD - DEM 耦合的集排式分肥装置颗粒运动数值分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):81 - 89.
YANG Qinglu, LI Zihan, LI Hongwen, et al. Numerical analysis of particle motion in pneumatic centralized fertilizer distribution device based on CFD - DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):81 - 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190809&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.009. (in Chinese)

(上接第 61 页)

[29] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农业大学学报, 1982(2):64 - 69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982(2):64 - 69. (in Chinese)

[30] 严霖元. 对农业机械工作部件滑切角的探讨[J]. 江西农业大学学报, 1991, 13(1): 64 - 68.
YAN Linyuan. An approach to the sliding cutting angle of the working parts of agricultural machinery[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1991,13(1): 64 - 68. (in Chinese)

[31] 梁仲维, 齐龙, 马旭, 等. QSC - 2 型步进式水稻除草机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(8): 115 - 119.
LIANG Zhongwei, QI Long, MA Xu, et al. Design and test of QSC - 2 marching type paddy weeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 115 - 119. (in Chinese)

[32] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软粘土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1065 - 1071.
CHEN Yingping, HUANG Bo, CHEN Yunmin. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1065 - 1071. (in Chinese)

[33] LEWIS B A. MANUAL for LS-DYNA soil material model 147 (FHWA - HRT - 04 - 095)[R]. USA Department of Transportation: Federal Highway Administration, 2004.

[34] 齐龙, 梁仲维, 马旭, 等. 耙压式除草轮与水田土壤作用的流固耦合仿真分析及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 29 - 37.
QI Long, LIANG Zhongwei, MA Xu, et al. Validation and analysis of fluid-structure interaction between rotary harrow weeding roll and paddy soil[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 29 - 37. (in Chinese)