

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.

气动式水稻株间机械除草装置研制

蒋郁^{1,2}, 齐龙¹, 龚浩¹, 刘闯¹, 陶明¹, 胡小鹿³, 陈琴苓⁴

(1 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 现代教育技术中心, 广东 广州 510642;
3 中国农村技术开发中心, 北京 100045; 4 广东省农业科学院, 广东 广州 510640)

摘要:【目的】针对水稻株间机械除草自动化程度低、难度大的问题,在机器视觉识别定位技术研究的基础上,研制一种气动式水稻株间机械除草装置。【方法】采用机械设计理论、离散元动力学仿真方法结合田间试验,研制出气动式水稻株间机械除草装置。首先对气动式株间除草机构的结构进行设计,运用运动学方程计算并确定机构的几何参数,通过Pro/E运动学仿真验证机构的可行性;然后对除草刀齿与水土土壤的相互作用过程进行仿真,并对仿真结果进行验证试验;最后进行田间试验验证整机工作性能,并利用三因素五水平二次旋转正交试验对影响除草率与伤苗率的工作参数进行分析。【结果】气动式水稻株间除草机构连杆长 35.00 mm,摆杆长 72.24 mm,除草部件到回转中心水平距离为 84 mm,垂直距离为 191 mm。离散元动力学仿真分析表明,倾角为 10°的弯齿刀除草刀齿与土壤的接触阻力较小,阻力平均值为 3.12 N,且对土壤的扰动程度较大,受影响的面积达 149.69 cm²。田间试验中,在机具前进速度 0.25 m/s、气缸伸缩速度 0.45 m/s 和除草深度 2.5 cm 的工作参数下,平均除草率为 83.91%、伤苗率为 3.63%。【结论】该机具满足除草率大于 80%、伤苗率小于 4% 的设计要求,能够满足水稻株间避苗除草的作业要求。

关键词: 水稻田; 株间除草; 离散元; 动力学仿真; 农业机械
中图分类号: S224.1; S24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)06-0037-13

Design and experiment of pneumatic paddy intra-row weeding device

JIANG Yu^{1,2}, QI Long¹, GONG Hao¹, LIU Chuang¹, TAO Ming¹, HU Xiaolu³, CHEN Qinling⁴
(1 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Modern Educational Technology Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3 China Rural Technology Development Center, Beijing 100045, China; 4 Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: 【Objective】 In order to solve the problem of low automation and high difficulty of mechanical intra-row weeding in paddy field, a pneumatic paddy intra-row weeding device was developed based on the recognition and positioning technology of machine vision. 【Method】 The mechanism of pneumatic intra-row weeding device was designed by applying the principle of mechanical design, discrete element dynamics (DEM) simulation method and field test. Firstly, the structure of pneumatic intra-row weeding device was designed, and the geometric parameters of the mechanism were calculated using the kinematic equations. The feasibility of the

收稿日期:2020-06-08 网络首发时间:2020-10-12 09:44:40
网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20201010.1943.006.html>
作者简介:蒋郁(1983—),女,高级工程师,博士, E-mail: nova_yy@scau.edu.cn; 通信作者: 陈琴苓(1969—),女,研究员,硕士, E-mail: chenqinling@126.com
基金项目:广东省重点领域研发计划(2019B020221002); 国家自然科学基金(31801258); 广东省杰出青年基金(2019B151502056); 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-01-43); 广州市科技计划(201803020021)

mechanism was determined from kinematic simulation by the motion analysis module of Pro/E. Then, the interaction between weeding blade and paddy soil was simulated and the simulation results were confirmed through test. Finally, the field test was carried out to evaluate the working performance of the whole machine, and the working parameters affecting weeding rate and seeding injury rate were analyzed using a three-factor and five-level quadratic rotation orthogonal test. 【Result】 The connecting rod length of the pneumatic intra-row weeding device was 35.00 mm and the oscillating rod length was 72.24 mm. The horizontal distance from the weeding part to the rotary center was 84 mm and the vertical distance was 191 mm. The DEM simulation results showed the better structure was the blending blade claw in 10°, which contact resistance was relatively low with an average value of 3.12 N when contacting with soil and the soil was disturbed to a great extent at this angle with affected area of 149.69 cm². The field test results showed the device achieved the optimum working performance with the average weeding rate of 83.91% and seedling injury rate of 3.63% when the machine forward speed was 0.25 m/s, the cylinder protruding speed was 0.45 m/s and the weeding depth was 2.5 cm. 【Conclusion】 The pneumatic paddy intra-row weeding device satisfies the requirements of above 80% weeding rate and below 4% seedling injury rate. It could meet the requirements of intra-row weeding and seedling avoiding in paddy field.

Key words: paddy field; intra-row weeding; discrete element; dynamic simulation; agricultural machinery

稻田杂草抑制水稻生长^[1], 增加水稻病虫害发生概率^[2], 是影响水稻产量和品质的主要原因^[3-4]。因此, 有效的稻田杂草防控一直是水稻安全生产的重要保障。近年来, 机械除草作为一种环境友好型的除草技术被广泛地应用于水稻生产中, 多用于去除行间杂草^[5]。与行间杂草相比, 水稻株间杂草多为近株杂草, 对水稻生长的影响更大, 但由于作物行的干扰, 如何避开水稻苗去除株间杂草是水稻机械化除草技术的难点。

国内外现有的水稻株间机械除草装置多利用移栽稻和杂草的生物力学特性、苗草根系深浅差异设计柔性除草部件或控制除草深度实现株间除草。日本三菱农机株式会社研制的水田除草机^[6], 采用柔性毛刷除去株间杂草, 田间试验表明该类型除草机能有效提高水稻产量和品质^[7]。欧莱克株式会社研制了一种四轮乘坐式除草机, 行间采用滚轮除草, 株间则采用弹性钢丝除草^[8]。美善株式会社研制了一种独轮的手扶式除草机, 行间采用滚轮除草, 株间则使用从动转动式的羽轮除草, 兼备除草和开沟的功能^[9]。王金武等^[10]研制的 3ZS-150 型水稻中耕除草机采用耕耘锄去除行间杂草; 采用软轴驱动立式除草装置, 利用弹性钢丝旋转去除株间杂草。以上水稻株间除草装置均不具备水稻植株和杂草的识别与定位功能, 株间除草率仅为 60% 左右^[11], 需多次作业才能完成除草要求, 但多次作业不仅降低了生产效率, 而且还增加了机具对秧苗的碾压概率。

为了降低伤苗率、提高除草效果, 株间除草技术常采用传感器定位作物或杂草位置, 选择性地避开秧苗, 从而去除杂草。有研究采用实时差分 GPS 技术定位作物位置并精确地控制除草装置避开作物^[12-13], 但该技术的硬件成本相对较高, 而且不适用于水稻等小株距作物。日本石井农机株式会社研制的水稻株间除草机采用距离传感器识别稻株并控制电磁阀通断, 喷射高压液体除草^[14]。采用机器视觉识别植株的避苗技术^[15-16]具有成本较低和控制系统相对简单的优点, 蒋郁等^[17]和 Jiang 等^[18]根据水田环境特点设计了基于机器视觉的水稻植株定位系统, 用以引导除草机构避开水稻苗实现株间除草。

除了与作物或杂草的定位精度有关, 株间机械除草效果还和除草机械装置的结构参数和运动参数关系密切^[19]。牛春亮等^[20]对水田株间除草部件的运动轨迹进行分析, 为稻田机械除草整机的研制提供了技术参考。贾洪雷等^[21]通过对玉米中耕避苗除草装置的运动速度与避苗区域半径的关系进行分析, 验证控制系统响应时间是否满足要求。在运动学分析基础上进行机械与水田土壤耦合的动力学分析^[22-23], 能够直观地揭示各种不同结构及参数对除草部件工作性能的影响, 从而对除草部件的局部结构进行更有针对性的优化。

在前期水稻植株定位方法研究的基础上, 本研究拟设计一种气动式水稻株间机械除草装置, 并对其运动学和动力学分析, 优化除草装置结构和工作参数, 以期提高水稻株间的除草效果。

1 气动式株间除草装置工作原理及总体结构

1.1 株间机械除草装置工作原理

气动式水稻株间机械除草装置根据秧苗动态图像的定位结果作出相应的动作决策控制。图像采集和处理系统的主要硬件有：智能彩色相机 (ISM1400C, 美国 Cognex)、工业镜头 (M0814-MP, 日本 Computer) 和上位机 (B470, 中国 Lenovo)。信号转换及控制系统的主要硬件为 I/O 模块 (CIO-MICRO-CC, 美国 Cognex) 和可编程逻辑控制器 PLC (FX2N-32MT, 日本 Mitsubishi)。

机具前进时, 装置处于除草状态, 当水稻植株图像进入检苗区域后, 采用机器视觉定位^[17]对秧苗进行动态定位; 上位机发送定位信息的数字信号至智能相机, 智能相机将数字信号转换成编码电信号后传输到 I/O 模块, I/O 模块解码信号并输出信号至 PLC, PLC 运行内部程序触发输出端口; 除草刀齿进入秧苗保护区后, 发出切换电磁阀位置的指令, 气缸杆伸出带动除草部件摆动, 从而实现避苗动作; 绕过稻株后, PLC 再次发出切换电磁阀位置的指令, 收回气缸杆, 装置重新恢复至除草状态。控制指令将一直循环, 直至工作结束。株间除草作业流程如图 1 所示。

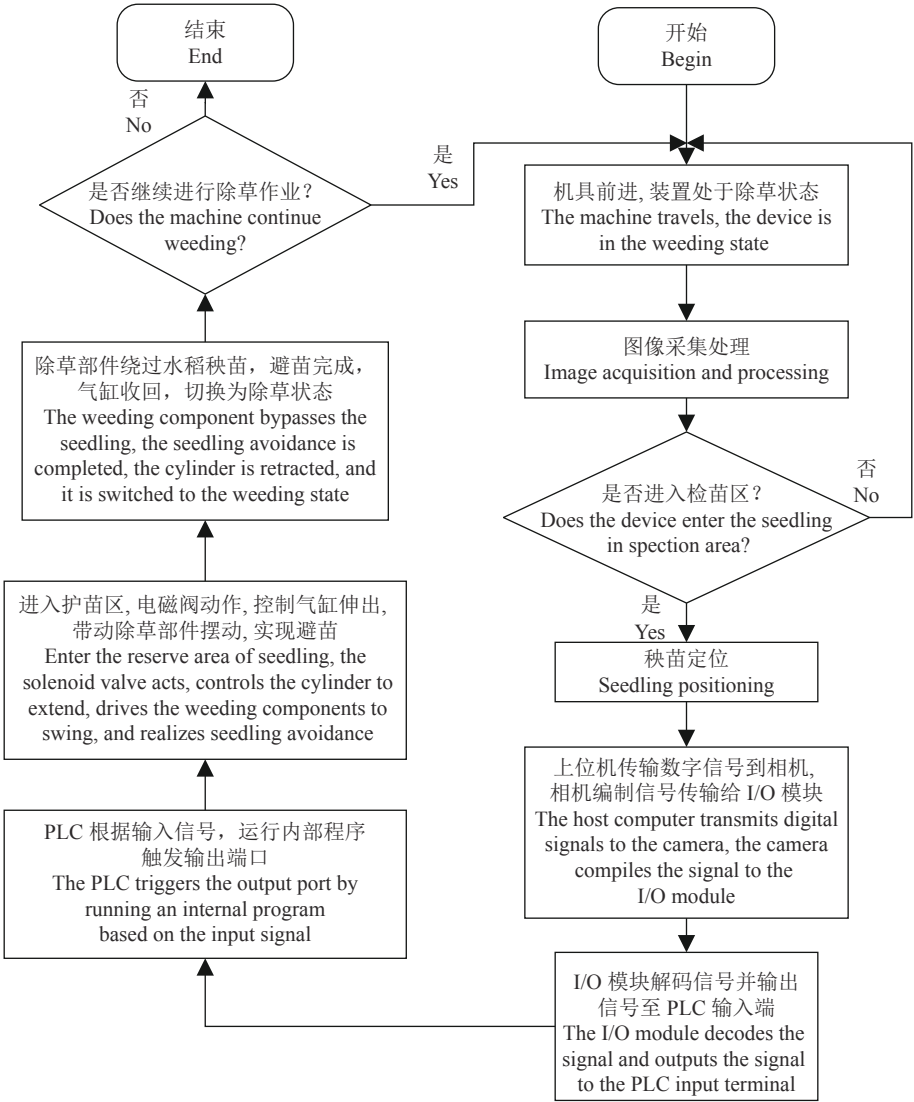


图 1 控制系统工作流程图

Fig. 1 Flow chart of control system

1.2 株间除草装置总体结构

气动摆动式株间除草装置由气源 (ZB-0.13/8, 中国浙江日金实业有限公司)、电磁阀 (4v210-08, 中国 Airtac)、气缸 (SC50×25)、连杆、摆杆、除草刀齿和控制系统组成, 具体组成如图 2 所示。除草装置随

牵引机具向垂直纸面方向移动, 安装在摆杆上的除草刀齿沿前进方向在株间入土破坏杂草, 达到株间除草的效果。当除草刀齿到达秧苗根部保护区域内时, 电磁阀动作使气路换向, 气缸杆伸出推动连杆带动摆杆转动, 安装在摆杆末端的除草刀齿随摆杆

转动离开株间土壤完成避苗动作。绕过稻株后,电磁阀再次使气路换向,气缸杆回缩拉动连杆带动摆杆使除草刀齿入土执行株间除草动作。

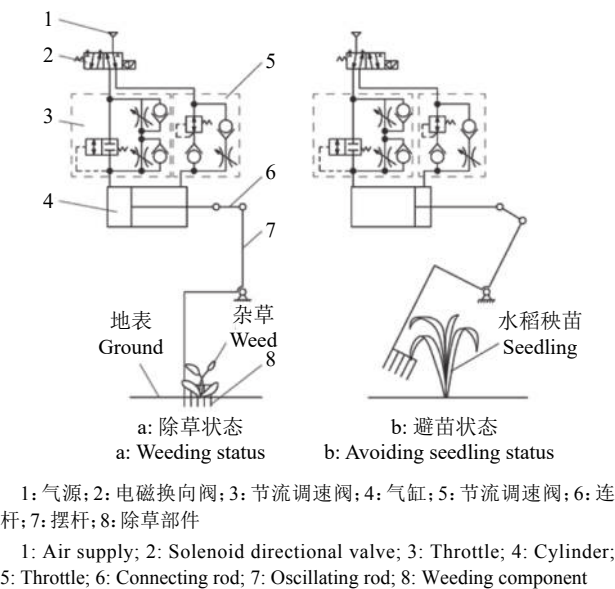


图 2 气动式株间除草装置示意图

Fig. 2 Sketch map of pneumatic intra-row weeding device

2 气动式株间除草机构的运动分析

气动式株间除草机构运动简图如图 3 所示,根据机构运动原理,机构平面自由度(F)的计算如下:

$$F = 3n - 2P,$$
 (1)

式中, n 为杆件和滑块数量, $n=3$, P 为铰链转动副和移动副的数量, $P=4$ 。根据式 (1) 计算出 $F=1$, 说明机构在平面内有唯一确定的运动轨迹。除草刀齿中心在平面内的运动轨迹为绕点 O 作圆周摆动, 摆动

的幅度与角速度和气缸的运动行程与速度相关。假设气缸伸出时, 推杆滑块作速度为 v 的匀速直线运动, 在气缸伸出的任意时刻 (t), 连杆长 (a)、摆杆长 (b)、摆动角度 (α) 和辅助角度 (β) 的几何关系根据余弦定理有:

$$a^2 = b^2 + \left[\sqrt{b^2 + (a - vt)^2} \right]^2 - 2b \sqrt{b^2 + (a - vt)^2} \cos(\alpha + \beta),$$
 (2)

其中, 根据直角三角形的正切值关系有:

$$\beta = \arctan \frac{a - vt}{b},$$
 (3)

将式 (3) 代入式 (2), 则摆动角度 (α) 与时间 (t) 的关系可求得为:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{2b^2 + v^2 t^2 - 2avt}{2b \sqrt{b^2 + (a - vt)^2}} \right] - \arctan \frac{a - vt}{b},$$
 (4)

用摆动角度对时间求导, 可得任意时刻除草刀齿的摆动角速度 (ω):

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt},$$
 (5)

通过式 (2)~(5) 可得连杆长和摆杆长与摆动杆的摆动角度和角速度的关系。根据几何关系, 可得任意时刻除草刀齿中心提升高度 (h) 和横向摆动距离 (w):

$$h = d - \sqrt{c^2 + d^2} \cos \left(\alpha + \arctan \frac{c}{d} \right),$$
 (6)

$$w = \sqrt{c^2 + d^2} \sin \left(\alpha + \arctan \frac{c}{d} \right) - c.$$
 (7)

气动式株间除草机构要有效地绕过秧苗, 依照入土深度最大为 30 mm 计算, 在避苗状态时规定除

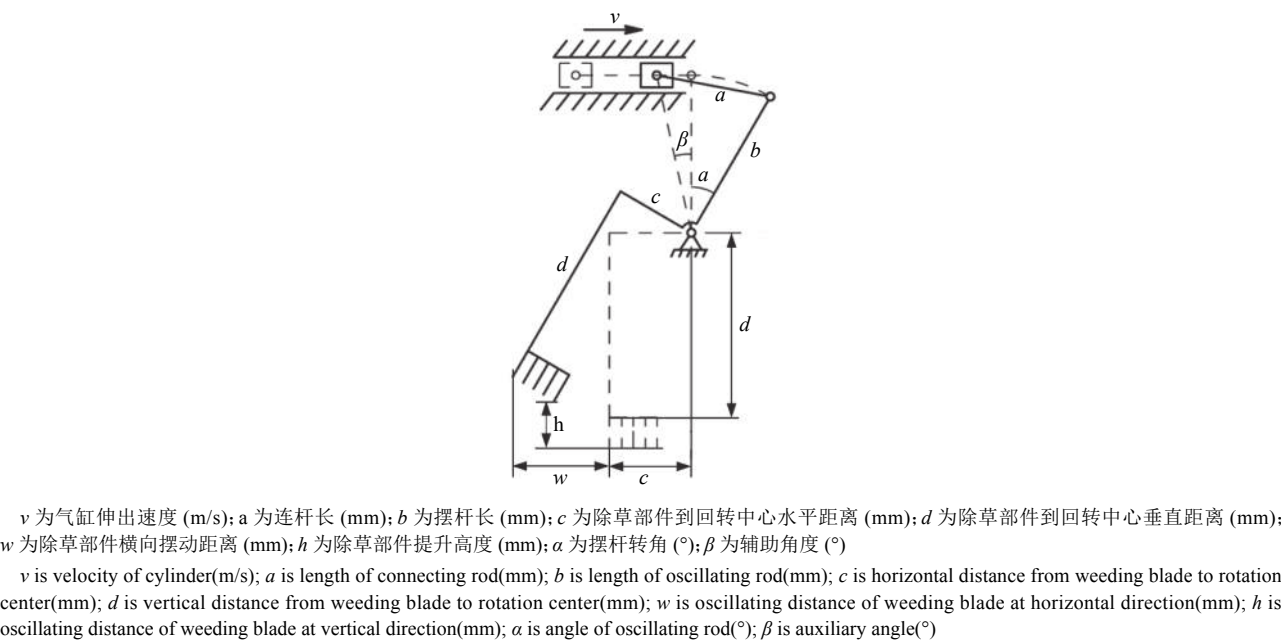


图 3 气动式株间除草机构运动简图

Fig. 3 Kinematic diagram of mechanism of pneumatic intra-row weeding device

草部件的中心提升高度要 $\geq 40\text{ mm}$, 此时除草部件完全离开土壤, 可避免损伤秧苗根部。茎基部保护区直径为 60 mm 的情况下, 规定除草部件横向移动距离 $\geq 60\text{ mm}$, 此时可以避免碰伤秧苗的茎部。同时, 为了提升传动的效率, 摆杆转角 $\leq 20^\circ$ ^[24]; 为避免机架碰撞秧苗茎部, 除草部件到回转中心垂直距离 $\geq 170\text{ mm}$ 。

本研究中, 先设定摆杆转角为 20° , 由于气缸行程为 25 mm , 则有 $vt=25\text{ mm}$, 根据式 (4) 可得连杆长 (a) 和摆杆长 (b) 的关系如图 4 所示, 图中 b 对 a 的变化不敏感 (a 增大 20 mm , b 只增大 0.5 mm), 故只需考虑 a 。为使机具整体结构紧凑和杆件轻量化, a 应当尽量小, 同时为避免杆件过小导致铰链与摆动杆干涉, 设计 $a=35.00\text{ mm}$, 此时可求得 $b=72.24\text{ mm}$ 。

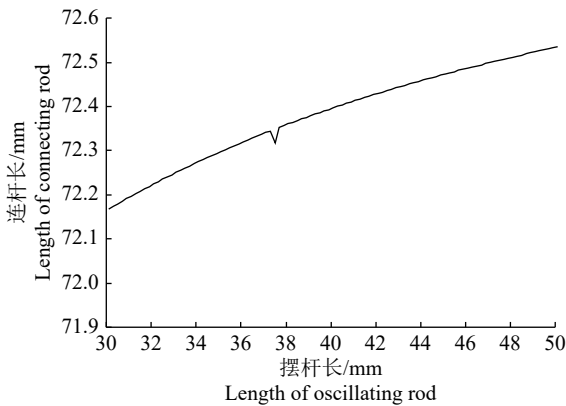


图 4 连杆长与摆杆长的关系

Fig. 4 Relationship of length of connecting rod and length of oscillating rod

将式 (6) 和式 (7) 移项后求平方和, 得到除草部件到回转中心水平距离 (c) 和除草部件到回转中心垂直距离 (d) 关于除草部件横向摆动距离 (w) 和提升高度 (h) 的关系式:

$$h^2 + w^2 = 2dh - 2wc, \tag{8}$$

暂设 $h=40\text{ mm}$, $w=60\text{ mm}$, 可得到:

$$d = \frac{130 + 3c}{2}, \tag{9}$$

将式 (9) 分别代入式 (6) 和式 (7) 可知, 当 $c=84\text{ mm}$, $d=191\text{ mm}$ 时, $h=40.25\text{ mm}$, $w=60.26\text{ mm}$, 均符合设计要求, 且此时除草部件到回转中心水平距离和除草部件到回转中心垂直距离处于最小状态, 满足紧凑和轻量化的设计需求。根据计算, 本研究设计气动式株间除草机构 $a=35\text{ mm}$, $b=72.24\text{ mm}$, $c=84\text{ mm}$, $d=191\text{ mm}$ 。

为研究设计出的气动式株间除草机构的运动轨迹是否满足规定需要, 将气动式株间除草机构的

三维模型导入 Pro-Engineer 软件, 运用机构运动仿真功能得到除草刀齿中心的运动轨迹。输入推杆滑块速度 0.25 m/s , 机具前进速度为 0.25 m/s , 可得除草刀齿中心的运动轨迹 (图 5), 除草刀齿能绕过护苗区, 设计参数符合要求。

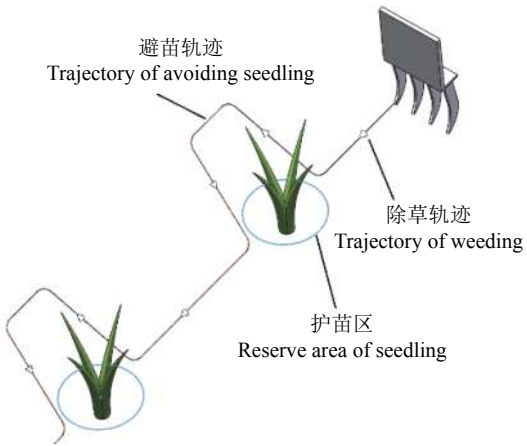


图 5 除草刀齿运动轨迹

Fig. 5 Trajectory of weeding blade

3 除草刀齿设计与仿真优化

3.1 除草刀齿结构设计

除草刀齿摆动入土后通过破坏杂草或扰动杂草根系附近的土壤达到除草目的, 故除草刀齿要求入土阻力小、入土后对土壤扰动大且不能出现壅土。根据上述要求设计出直齿刀和弯齿刀 2 种除草刀齿, 如图 6 所示。为覆盖秧苗苗带区域, 除草刀齿的作业宽度设计为 60 mm 。根据经验, 刀齿数过多易引起壅土, 过少则导致除草率低, 综合考虑刀齿数量设计为 4 片。2 种刀齿入土过程中先接触土壤的部分设计为锐角尖端, 使其碰触土壤时更容易侵入破坏土壤表面从而更容易入土, 刀片外形设计能减小刀齿平移方向的土壤阻力, 同时依靠刀片侧面黏附和扰动土壤达到除草的目的。直齿刀的刃部从根部到尖端过渡形状为直线, 弯齿刀的过渡形状则为曲线。2 种刀刃的设计具有如下特点: 直齿刀的直线触土面容易产生较大的黏附效果, 除草效果好但阻力较大; 而弯齿刀的曲线触土面对土壤具有一定的翻转作用且拥有较优的力学性能^[25]。刀刃根部轮廓切线与垂直平面逆时针所成的角度称为倾角。为确保土壤不沿刀刃向上积累引起壅土, 应倾角 $\geq 0^\circ$, 同时应避免倾角过大导致刀片尺寸过长, 故设计倾角的范围为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 。根据水田土壤高湿高阻的工作环境, 关键除草部件的材料选用抗氧化性、耐腐蚀性和耐磨性的 20CrMnTi 号钢, 采用数控电火花机床进行加工, 考虑除草刀片要有足够的机械强度, 刀片厚 2 mm 。

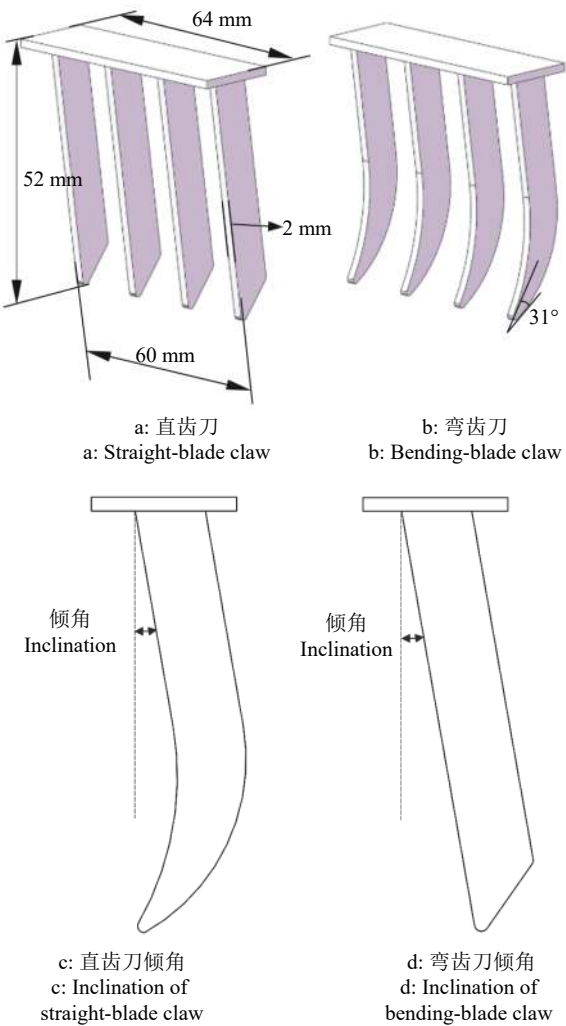


图 6 除草刀齿结构

Fig. 6 Weeding blade structure

3.2 除草刀齿-水田土壤相互作用的仿真分析

为了模拟并分析 2 种除草刀结构 (直齿刀和弯齿刀) 和刀齿倾角 (0、5、10、15 和 20°) 对前进阻力和土壤的扰动程度的影响, 得到较小前进阻力和较大土壤扰动程度的因素组合, 运用离散元动力学仿真方法^[26-27], 并参考相关文献^[28]的方法, 在 EDEM 软件中建立 2 种尺寸的球形颗粒模型分别代表水和土壤, 将水颗粒覆盖在土壤颗粒上并使其自然向下渗透, 模拟自然泥水的形成过程。颗粒模型采用 Hertz-Mindlin with JKR Cohesion 模型建立, 该模型能够很好地模拟水田土壤颗粒间因静电和水分等原因发生明显黏结和团聚的物理特性。所建立的水田土壤模型, 上部分为水颗粒层, 中间为水颗粒与土壤颗粒混合的饱和土壤层, 下层为有少量水颗粒的土壤层。广东省的水田土壤以砂质黏土为主, 根据相关文献^[23,28-29]确定水田土壤参数与水颗粒参数, 通过 EDEM 官方材料数据库 (GEMM 数据库) 获取除草刀具材料参数。土壤与水离散元颗粒和除草刀模型的材料参数如表 1 所示, 材料间接触参数如表 2 所示。

对不同结构与不同倾角的除草刀齿与水田土壤的相互作用进行离散元动力学仿真。除草刀的前进速度设置为 0.2 m/s, 最大入土深度不宜超过移栽秧苗的根系深度^[30], 刀齿最大入土深度为 3 cm。土壤阻力通过土壤阻力-时间折线图 (图 7) 表明, 规定除草刀齿与土壤接触的时刻为 0, 仿真时间共 0.5 s。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料 Material	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量/MPa Shear modulus	密度/(kg·m ⁻³) Density	颗粒半径/mm Particle radius	颗粒接触半径/mm Contact radius
土壤 Soil	0.500	11.5	1830	0.5	0.7
水 Water	0.500	100.0	1 000	0.2	
除草刀 Weeding blade	0.288	2.8×10 ⁴	7 860		

表 2 材料间接触参数

Table 2 Contact parameters between materials

材料 Material	恢复系数 Coefficient of restitution	静摩擦系数 Coefficient of static friction	动摩擦系数 Coefficient of rolling friction
水-水 Water-water	0.05	0.05	0.01
土壤-土壤 Soil-soil	0.05	0.90	0.01
土壤-水 Soil-water	0.05	0.05	0.01
土壤-除草刀 Soil-weeding blade	0.10	0.20	0.20
水-除草刀 Water-weeding blade	0.10	0.20	0.20

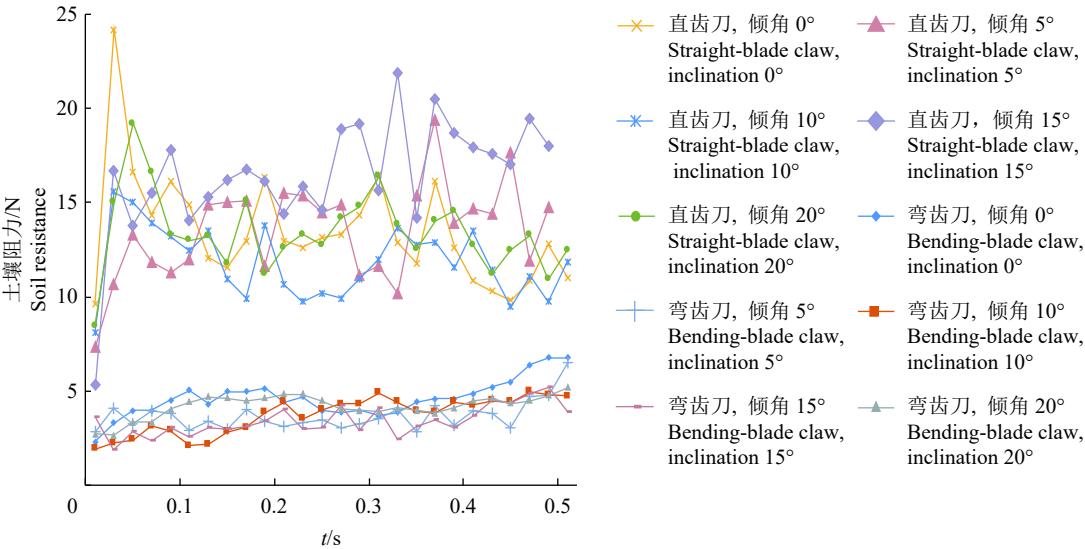


图 7 除草刀所受土壤阻力仿真结果
Fig. 7 Simulation results of soil resistance to weeding blades

根据仿真结果,不同倾角(0°、5°、10°、15°和20°)的直齿刀对应的阻力最大值分别为24.18、19.38、15.55、21.89和19.20 N,对应的阻力平均值为14.30、13.53、12.94、15.82和15.49 N;而不同倾角(0°、5°、10°、15°和20°)弯齿刀对应的阻力最大值为5.78、5.69、4.98、5.20和5.73 N,对应的阻力均值为4.04、3.63、3.12、3.40和3.54 N。直齿刀所受的土壤阻力大于弯齿刀,不同类型的刀齿受土壤的阻力最大值与平均值均随着倾角增大呈先减后增的趋势。综上,倾角为10°的弯齿刀破坏土壤时受到土壤的阻力较小。

利用 EDEM 的后处理器,得到土壤颗粒的运动速度分布,土壤颗粒受除草刀扰动会产生运动速度,可根据产生运动速度的颗粒数量判定土壤受扰

动程度的大小。垂直于刀齿前进方向,在刀齿尖端处做截面,观察同一时刻(0.5 s)截面上颗粒的运动速度分布,如图 8 所示。颗粒的运动速度范围为 0~0.100 m/s,在刀齿附近的土壤颗粒为扰动土壤颗粒,速度分布在 0.033~0.100 m/s,因此规定速度大于 0.033 m/s 的颗粒为受扰动的颗粒。使用 Photoshop 图像处理软件统计出截面内受扰动颗粒像素所占的面积,面积越大,说明土壤受扰动程度越大。统计结果见表 3,根据统计结果,倾角为 10°的弯齿刀产生的土壤扰动程度较大,被扰动的土壤区域面积为 149.69 cm²。

综合仿真结果可知,倾角为 10°的弯齿刀与土壤相互作用时产生的阻力较小、土壤扰动程度较大,是较优的设计。

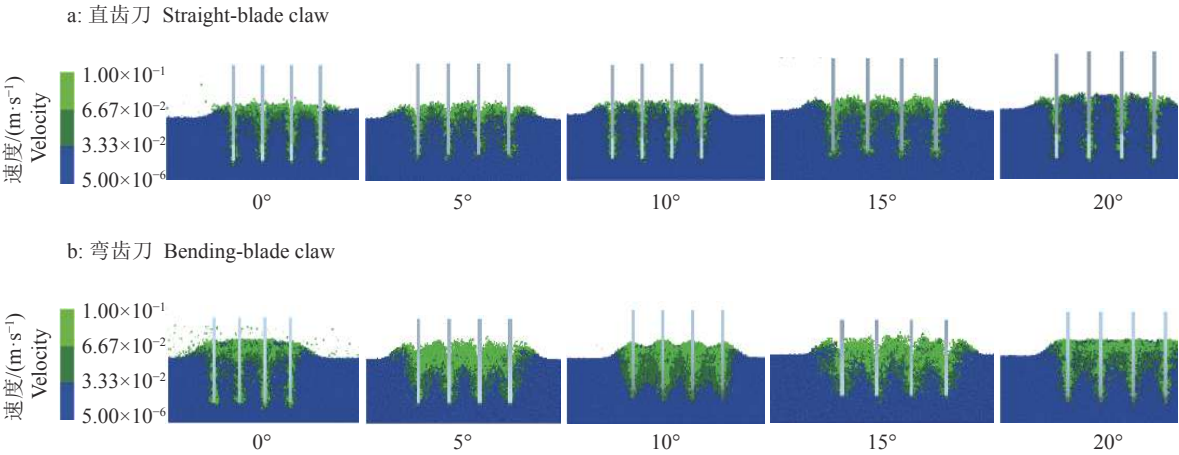


图 8 不同除草刀齿不同倾角作用下水田土壤颗粒运动速度分布

Fig. 8 Distribution of particle motion velocity under different weeding blade claw with different inclinations in paddy soil

3.3 仿真结果验证

为验证离散元动力学仿真结果是否与实际情 况相符,于 2018 年 11 月在华南农业大学工程学院 土槽试验平台对弯齿刀进行测试试验,每种除草刀

表 3 受扰动颗粒统计结果

Table 3 Statistical result of particles under turbulence

除草刀 Weeding blade	倾角/(°) Tilt angle	像素数量 Number of pixels	图像面积/cm ² Image area
直齿刀 Straight-blade	0	70 201	87.35
	5	67 096	83.49
	10	58 381	72.65
	15	54 773	68.16
	20	48 267	60.07
弯齿刀 Bending-blade	0	82 182	102.30
	5	108 747	135.37
	10	120 277	149.69
	15	111 040	138.22
	20	102 145	127.14

进行 3 次重复试验, 每次试验后将土槽泥土恢复平整, 测试不同倾角弯齿刀除草部件作业时的土壤阻力。具体设计如图 9 所示, 土槽试验平台由土槽、滑轨支架和移动平台组成。土槽在试验前进行泡水、搅拌、混合等处理, 并静置 2 d, 形成上部覆有水层的仿饱和水田土壤; 移动平台由 130BYG350D 步进

电机 (步距角 1.2°, 步距精度 5%) 提供前进动力, 测试过程中移动平台的速度为 0.2 m/s, 除草刀的入土深度为 30 mm; 除草刀和 DS2-500N-S 推拉力传感器 (测量范围 0~500 N, 精度为±0.1%F.S, 最小读数达到 0.01 N) 安装在移动平台上, 拉力传感器的采集频率为 50 Hz。由于平台匀速移动, 拉力传感器测得的牵引力与土壤阻力大小相等、方向相反, 所测的牵引力经转换后以数字信号的形式存储于计算机。

土壤阻力实测值结果如图 10 所示, 弯齿刀接触土壤后所受的阻力呈平稳上升趋势。在刀齿完全入土后土壤阻力在 2~7 N 稳定波动, 且较平稳, 数据变化趋势与仿真结果相似。试验过程中不同倾角弯齿刀所受最大阻力和平均阻力的实测值见表 4, 结果 (表 4) 显示, 弯齿刀的实测值大于仿真值, 验证结果与仿真值误差小于 20%, 土壤阻力仿真结果可靠。

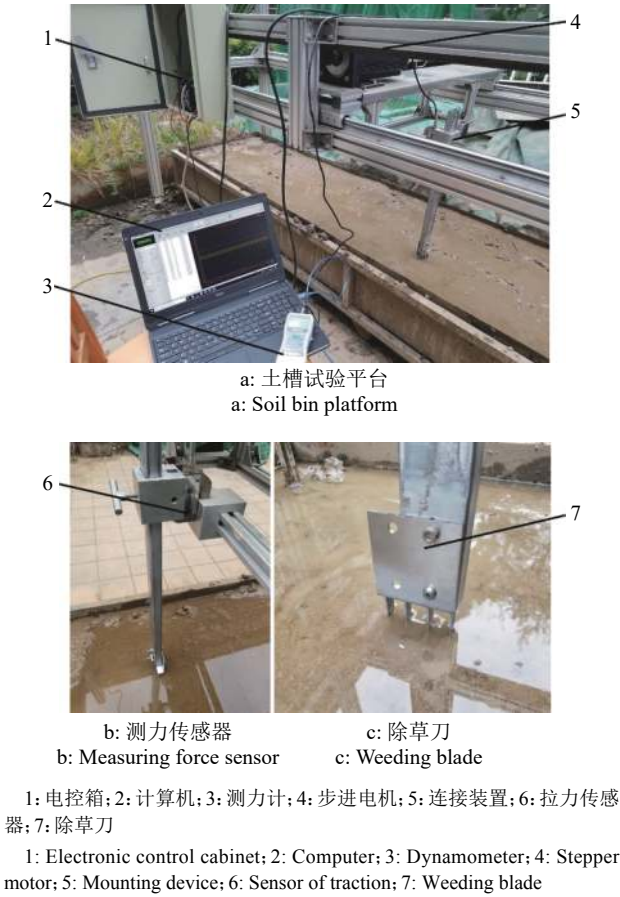


图 9 仿真结果土槽验证试验

Fig. 9 Soil bin validation experiment of simulation result

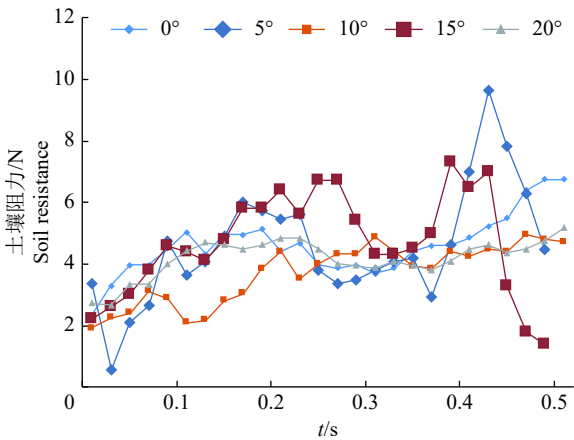


Fig. 10 Measured soil resistance to bending-blade claw in variant inclination

表 4 弯齿刀土槽试验实测数据与仿真结果

Table 4 Measured data of bending blade experiment in soil bin and the simulation result

倾角/(°) Inclination	最大阻力/N Maximum soil resistance			平均阻力/N Average soil resistance		
	实测值	仿真值	相对误差/%	实测值	仿真值	相对误差/%
	Test data	Simulation data	Relative error	Test data	Simulation data	Relative error
0	6.80	5.78	17.65	4.62	4.06	14.36
5	6.30	5.69	10.72	4.31	3.67	18.73
10	5.00	4.98	0.40	3.72	3.16	19.23
15	6.17	5.20	18.65	3.98	3.40	17.06
20	5.20	5.68	9.25	4.20	3.54	18.64

4 田间试验

4.1 试验材料

株间除草装置结构优化 (选用弯刀式、倾角 10° 的除草刀齿) 后, 为验证在不同工作参数下的综合工作性能 (除草率及伤苗率), 并选出较优的工作条件, 2019 年 4 月 5 日在广东省肇庆市农业科学研究所试验田中进行机械除草单体搭载的田间性能试验。试验于插秧后 15 d 进行, 试验使用的水稻品种为 ‘恒丰优 3 512’, 秧苗平均高度为 270 mm、株距约为 150 mm。试验田内杂草以稗草、千金子、节节菜和陌上菜为主, 杂草的平均根系深度为 22 mm, 株间杂草平均密度为每平方米 160 株。田块于试验前 1 d 蓄水 30 mm, 试验当天放水, 试验时泥脚深度约为 200 mm。田间试验现场如图 11 所示。



图 11 株间除草装置田间试验现场

Fig. 11 Scene of field experiment of paddy intra-row weeding device

4.2 试验方法

株间除草装置单体的田间性能试验以气缸伸缩速度、机具前进速度和除草深度 3 个工作参数作为试验因子, 采用三因素五水平二次旋转正交试验设计, 分析各工作参数对除草率 (y_1) 和伤苗率 (y_2) 的影响, 除草率与伤苗率定义如下:

$$y_1 = \frac{Z - S}{Z} \times 100\%, \tag{10}$$

$$y_2 = \frac{I}{M} \times 100\%, \tag{11}$$

式中, Z 为试验区域内水稻行间杂草总株数, S 为除草作业后试验区域内水稻行间剩余杂草株数, I 为除草作业后试验区域内被压折、连根拔起和倒伏的损伤秧苗数, M 为试验区域内的总秧苗数。试验因素水平编码表如表 5 所示。

表 5 试验因素水平编码表

Table 5 Factor level coding table for experiment

编码值 Coded value	气缸伸缩	机具前进	除草
	速度(x_1)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	速度(x_2)/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	深度(x_3)/cm
	Cylinder protruding speed	Machine forward speed	Weeding depth
$+\gamma$	0.43	0.28	2.84
$+1$	0.40	0.25	2.50
0	0.35	0.20	2.00
-1	0.30	0.15	1.50
$-\gamma$	0.27	0.12	1.16

选取 23 块 30 m 长的地块作为试验区域, 每个试验区域前后各 5 m 长的区域作为加速和减速的缓冲区, 以保证机器能以稳定的工作状态通过试验区域。由 2 名计数员分别统计各自测试区域内杂草数和伤苗数, 对测得的试验数据取平均值并转化为相应的除草率与伤苗率。

4.3 试验数据及分析

试验结果如表 6 所示。根据表 6 的试验数据, 分析各因子对除草率的影响结果的方差分析如表 7 所示, 比较各因子的 F 值可知, 除草率显著性的影响因子依次为除草深度 (x_3)、机具前进速度 (x_2)、气缸伸缩速度 (x_1)。将影响不显著的因子 (x_1) 剔除, 得到除草率 (y_1) 的回归模型方程:

$$y_1 = 73.66 + 4.86x_2 + 7.07x_3 - 1.19x_2^2 - 2.79x_3^2. \tag{12}$$

表 6 试验方案及结果

Table 6 Experimental scheme and results

试验编号	气缸伸缩速度/(m·s ⁻¹)	机具前进速度/(m·s ⁻¹)	除草深度/cm	除草率/%	伤苗率/%
Test number	Cylinder protruding speed	Machine forward speed	Weeding depth	Weeding rate	Seedling injury rate
1	0.30	0.30	1.50	61.24	2.40
2	0.40	0.30	1.50	60.55	2.02
3	0.30	0.25	1.50	66.89	4.55
4	0.40	0.25	1.50	67.94	2.76
5	0.30	0.30	2.50	72.98	3.77
6	0.40	0.30	2.50	72.16	3.35
7	0.30	0.25	2.50	81.13	4.04
8	0.40	0.25	2.50	81.17	3.85
9	0.27	0.000	2.00	75.39	4.23
10	0.43	0.000	2.00	74.03	2.90
11	0.35	0.12	2.00	59.12	2.49
12	0.35	0.28	2.00	80.59	4.25
13	0.35	0.20	1.16	51.76	1.84
14	0.35	0.20	2.84	78.93	3.93
15	0.35	0.20	2.00	72.92	3.27
16	0.35	0.20	2.00	75.77	3.43
17	0.35	0.20	2.00	76.14	3.03
18	0.35	0.20	2.00	72.37	3.11
19	0.35	0.20	2.00	73.71	3.27
20	0.35	0.20	2.00	73.96	2.93
21	0.35	0.20	2.00	72.24	3.52
22	0.35	0.20	2.00	71.90	3.17
23	0.35	0.20	2.00	74.06	3.48

表 7 各因子对除草率影响的方差分析表

Table 7 Variance analysis of influence from each factor to weeding rate

来源 Source	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 157.79	9	128.64	31.59	<0.000 1
<i>x</i> ₁	0.54	1	0.54	0.131 8	0.722 4
<i>x</i> ₂	321.95	1	321.95	79.05	<0.000 1
<i>x</i> ₃	682.08	1	682.08	167.48	<0.000 1
<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	0.85	1	0.85	0.207 5	0.656 3
<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	0.16	1	0.16	0.039 9	0.844 8
<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	2.12	1	2.12	0.521 0	0.483 2
<i>x</i> ₁ ²	4.37	1	4.37	1.07	0.319 4
<i>x</i> ₂ ²	22.59	1	22.59	5.55	0.034 9
<i>x</i> ₃ ²	123.41	1	123.41	30.30	0.000 1
残差 Residual	52.94	13	4.07		
失拟项 Lack of fit	34.77	5	6.95	3.06	0.077 6
纯误差 Pure error	18.18	8	2.27		
总和 Sum	1 210.74	22			

根据表 6 的试验数据, 各因子对伤苗率的影响结果的方差分析如表 8 所示, 模型的 *F* 值为 16.85, *P*<0.000 1, 表明该模型可信; 失拟项 *F* 值为 2.48, *P*=0.121 5, 差异不显著, 表明该模型的拟合程度良好; 因子 *x*₁、*x*₂、*x*₃ 影响极显著, 因子 *x*₂*x*₃ 在水平 α =0.05 时影响显著, 因子 *x*₁*x*₃、*x*₁² 在水平 α =0.1 时影响显著, 其他因子影响不显著; 比较各因子的 *F* 值可知, 影响伤苗率显著性的因子依次为除草深

表 8 各因子对伤苗率影响的方差分析表

Table 8 Variance analysis of influence from each factor to seedling injury rate

来源 Source	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	9.9900	9	1.1100	16.85	<0.000 1
<i>x</i> ₁	1.8400	1	1.8400	27.98	0.000 1
<i>x</i> ₂	3.2100	1	3.2100	48.71	<0.000 1
<i>x</i> ₃	3.3800	1	3.3800	51.32	<0.000 1
<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	0.1740	1	0.1740	2.64	0.1280
<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	0.3042	1	0.3042	4.62	0.051 1
<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	0.561 8	1	0.561 8	8.53	0.011 9
<i>x</i> ₁ ²	0.2560	1	0.2560	3.89	0.070 3
<i>x</i> ₂ ²	0.053 4	1	0.053 4	0.81	0.384 2
<i>x</i> ₃ ²	0.204 6	1	0.204 6	3.11	0.101 5
残差 Residual	0.856 3	13	0.065 9		
失拟项 Lack of fit	0.520 7	5	0.104 1	2.48	0.121 5
纯误差 Pure error	0.335 6	8	0.042 0		
总和 Sum	10.8500	22			

度、机具前进速度和气缸伸缩速度。将影响不显著的因子剔除,得到伤苗率(*y*₂)的回归模型方程为:

$$y_2=3.24-0.37x_1+0.48x_2+0.50x_3+0.20x_1x_3-0.27x_2x_3+0.13x_1^2。$$

(13)

根据回归方程(12),气缸伸缩速度对除草率的影响不显著,因此将气缸伸缩速度设定在零水平,即 0.35 m/s,得到的响应曲面如图 12 所示。分析可知,除草率最低为 60%,除草率随着机具前进速度和除草深度的增加而增加,两者达到最大时,除草率最大(82%)。通过比较发现,除草深度对除草率的影响更加显著。

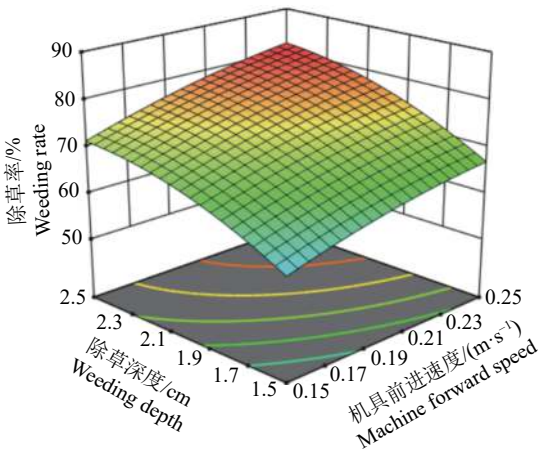


图 12 机具前进速度和除草深度对除草率影响的响应曲面

Fig. 12 Response surface of machine forward speed and weeding depth to weeding rate

将除草深度设定为零水平,即 2.0 cm,得到气缸伸缩速度与机具前进速度的伤苗率响应曲面(图 13a)。分析图 13a 可知,伤苗率最低为 2.73%,最高为

4.39%,且伤苗率随着气缸伸缩速度的升高和机具前进速度的降低而降低。气缸伸缩速度升高会导致机具前进速度对伤苗率的影响减弱,同时机具前进速度的降低也会导致气缸伸缩速度对伤苗率的影响减弱。当气缸伸缩速度最高而机具前进速度最低时,伤苗率达到最小值。

将机具前进速度设定为零水平,即 0.20 m/s,得到气缸伸缩速度与除草深度的伤苗率响应曲面(图 13b)。分析图 13b 可知,伤苗率最低为 2.25%,最高为 3.91%,且伤苗率随着气缸伸缩速度的升高和除草深度的降低而降低。气缸伸缩速度升高会导致除草深度对伤苗率的影响增强,同时增加除草深度也会减弱气缸伸缩速度对伤苗率的影响。当气缸伸缩速度最高而除草深度最低时,伤苗率达到最小值。

将气缸伸缩速度设定为零水平,即 0.35 m/s,得到机具前进速度与除草深度的伤苗率响应曲面(图 13c)。分析图 13c 可知,伤苗率最低为 1.99%,最高为 3.89%,且伤苗率随着机具前进速度和除草深度的增加而增加。当机具前进速度和除草深度同时最小时,伤苗率达到最小值。

根据以上的分析,结合机具实际工作的要求,设定机具前进速度为 0.25 m/s,气缸伸缩速度为 0.45 m/s,除草深度为 1.0~3.0 cm。以除草率>80%,伤苗率<4%为目标,利用 Design-Expert 11 软件进行参数优化分析,在符合优化目标的参数中,除草深度的均值为 2.42 cm,因此除草深度选择 2.50 cm。

在国家水稻产业技术体系肇庆市农业科学研究所开展水稻株间机械除草性能多点重复田间试验,采用优化的工作参数,气缸伸缩速度 0.45 m/s、机具前进速度 0.25 m/s 和除草深度 2.5 cm。每次试

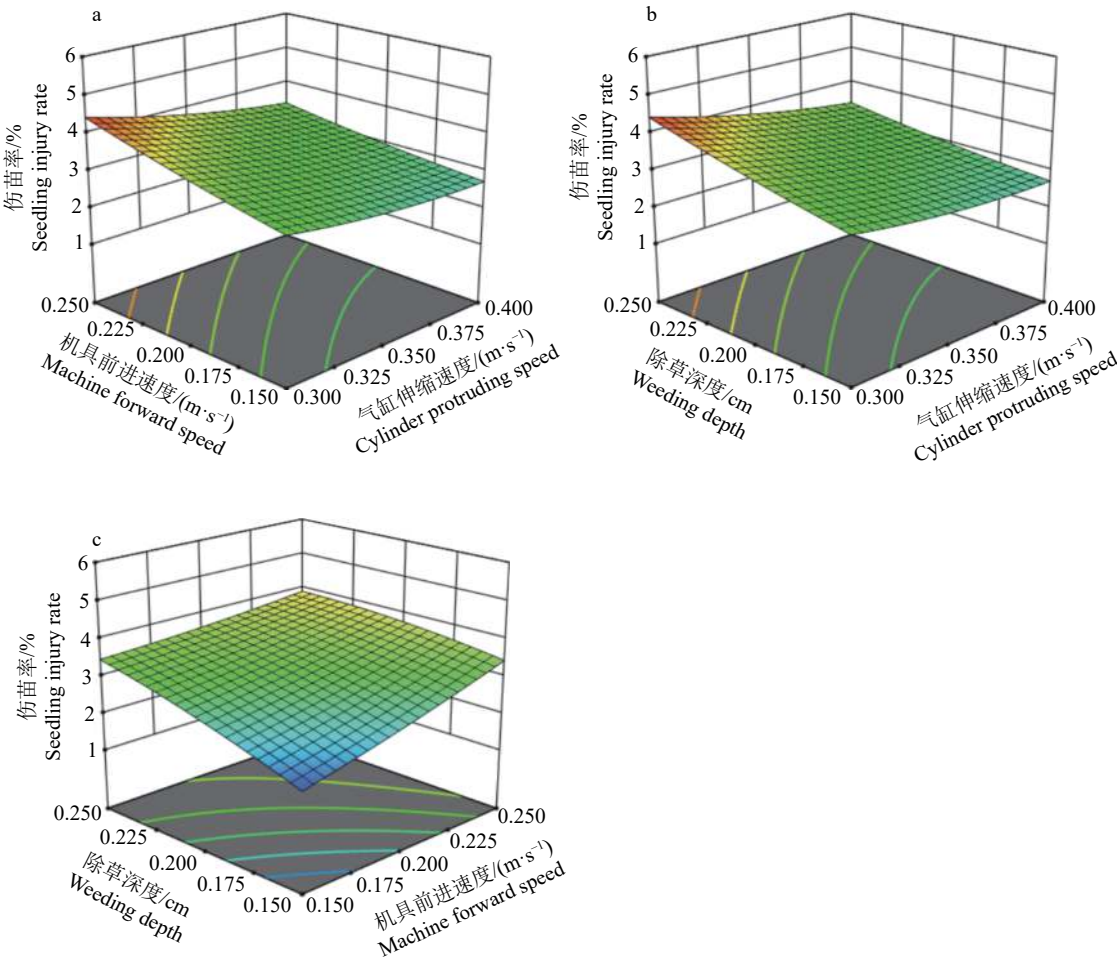


图 13 不同影响因子对伤苗率影响的响应曲面

Fig. 13 Response surface of influence from each factor to seedling injury rate

验分别选取 30 m 长的地块作为试验区域, 重复 5 次, 试验结果取平均值。试验结果表明肇庆不同水稻品种的平均除草率为 83.91%, 伤苗率为 3.63%, 该除草装置能够满足水稻株间除草的性能要求。

5 结论

本研究在稻株机器视觉识别定位技术研究的基础上, 采用机械设计理论、离散元动力学仿真方法结合田间试验研制出气动式水稻株间机械除草装置, 结论如下:

1) 运用机械设计原理设计气动式株间除草机构及其关键参数, 得到气动式株间除草机构的连杆长 35 mm, 摆杆长 72.24 mm, 除草部件到回转中心水平距离 84 mm, 垂直距离 191 mm。通过理论计算及 Proe 运动学仿真验证其运动轨迹并测得除草部件提升高度 40.25 mm>40 mm, 除草部件横向摆动距离 60.26 mm>50 mm, 符合株间避苗除草的要求。

2) 利用 EDEM 软件建立水田土壤泥水混合的颗粒模型, 在此基础上进行不同结构和倾角组合的除草刀齿与水田土壤相互作用的离散元动力学仿

真分析。根据仿真结果可得: 关键除草部件形态为弯齿刀、倾角为 10°时, 关键除草部件与土壤接触时阻力较小, 为 3.12 N, 且对土壤的扰动程度较大, 受影响的面积达 149.69 cm²。土槽试验验证结果表明土壤阻力实测值与仿真值结果一致, 误差基本小于 20%, 仿真结果可靠。

3) 对株间除草装置整机进行田间试验, 试验采用二次正交旋转组合设计, 得到气缸伸缩速度、机具前进速度和除草深度对除草率和伤苗率的影响规律, 优化结果表明: 在机具前进速度为 0.25 m/s, 气缸伸缩速度为 0.45 m/s, 除草深度为 2.5 cm 的条件下, 平均除草率为 83.91%, 伤苗率为 3.63%, 满足株间除草率>80%, 伤苗率<4% 的性能要求。

参考文献:

[1] 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): 1293-1301.
[2] 李涛, 刘德好, 郭水良, 等. 双穗雀稗-空心莲子草杂草群落对稻田节肢动物、水稻产量的影响及其防除经济阈值[J]. 上海农业学报, 2013, 29(2): 47-51.

- [3] 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.
- [4] 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]. 生态学杂志, 2014, 25(11): 3177-3184.
- [5] 齐龙, 梁仲维, 蒋郁, 等. 轻型水田除草机的设计及试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(3): 1004-1012.
- [6] 岛根县, 三菱农机株式会社. 水田用の除草作業機: P2012-187073A [P]. 2012-10-04.
- [7] 月森弘, 安达康弘, 三代满, 等. 回転ブラシ除草が水稻の生育、収量、品質および雑草抑制に及ぼす影響[C]. 日本作物学会演讲会要旨集第234回日本作物学会講演会. 日本作物学会, 2012(234): 62-63.
- [8] 株式会社オーリック. 水田除草作業機: P2014-76004A [P]. 2014-05-01.
- [9] 株式会社美善. 水田除草兼用沟切り機: P2008-99575A [P]. 2008-05-01.
- [10] 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.
- [11] 石井博和, 佐藤正憲. 水田中耕用除草機の性能と除草効果向上方策[J]. 日本作物学会関東支部会報, 2006, 21: 22-23.
- [12] NORREMARK M, GRIEPENTROG H W, NIELSEN J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. *Biosys Eng*, 2008, 101: 396-410.
- [13] PEREZRUIZ M, SLAUGHTER D C, GLIEVER C, et al. Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops[J]. *Comput Electron Agr*, 2012, 80: 41-49.
- [14] 株式会社石井農機. 水田用除草装置及びこれを備えた水田用除草行走装置: P2010-68778A [P]. 2010-04-02.
- [15] 寺脇正樹, 片岡崇, 岡本博史, 等. 直播テンサイ用自動間引き・除草機の開発[J]. 農業機械学会誌, 2005, 67(5): 80-85.
- [16] 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.
- [17] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 23-31.
- [18] JIANG Y, CUI H W, QI L, et al. Recognition and positioning method of rice seedlings based on machine vision[J]. *IJSIP*, 2016, 9(9): 265-278.
- [19] 胡炼, 罗锡文, 严乙桢, 等. 基于爪齿余摆运动的株间机械除草装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 10-16.
- [20] 牛春亮, 王金武. 稻田株间除草部件工作机理及除草轨迹试验[J]. 农机化研究, 2017(1): 177-181.
- [21] 贾洪雷, 李森森, 王刚, 等. 中耕期玉米田间避苗除草装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 15-22.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 郑文伟, 吴克坚. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 85-86.
- [25] 张鹏, 郭志军, 倪利伟, 等. 触土曲面准线曲率特征及其减阻性能分析[J]. 农机化研究, 2017, 2: 11-16.
- [26] LI B, CHEN Y, CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method[J]. *Soil Till Res*, 2016, 158: 177-185.
- [27] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62-72.
- [28] 陆华忠, 罗锡文. 水田驱动叶轮轮叶下土壤流动特性与动力性能研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 50-53.
- [29] 郭立岩, 齐胜, 宋玉秋, 等. 水田作业机械仿生表面减阻机理的离散元研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(1): 55-62.
- [30] 葛茜, 马晓丽, 史莉娜, 等. 汉中水稻机械插秧插植深度试验初报[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(9): 16-17.

【责任编辑 霍欢】