

抛推组合式草土分离前胡除草机设计与试验

曹成茂¹ 向旺¹ 罗坤¹ 吴正敏² 张雪晨¹ 秦宽¹
(1.安徽农业大学工学院,合肥 230036; 2.安徽农业大学茶与食品科技学院,合肥 230036)

摘要: 针对丘陵山区前胡种植使用除草机时存在草土不分离导致杂草复生、碎石飞射伤人的问题,设计了一款抛推组合式草土分离除草机。对称螺旋结构的除草轮将土推向两侧,避免碎石飞射伤人。刀齿将杂草抛向后方实现草土分离,防止杂草复生。螺旋结构除草轮采用中轴对称左右旋向相反布置,使得碎石沿轴向两边飞离,有效防止碎石飞射伤到后方机手。通过理论分析确定除草轮的齿形、齿数,分别进行除草轮在杂草-土壤、碎石-土壤模型中的运动分析。使用 EDEM 和 ANSYS 耦合仿真,验证其工作性能和物理性能。通过田间试验,验证除草轮能够实现草土分离,得出机具的最佳工作参数为:除草轮转速 13 r/s、前进速度 400 mm/s、除草深度 35 mm,平均除净率为 86.7%。

关键词: 前胡; 除草机; 抛推组合式; 耦合仿真

中图分类号: S224.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)03-0106-09 **OSID:** 

Design and Experiment of *Radix Peucedani* Weeding Machine Separating Weeds and Soil with Combination of Throwing and Pushing

CAO Chengmao¹ XIANG Wang¹ LUO Kun¹ WU Zhengmin² ZHANG Xuechen¹ QIN Kuan¹
(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China
2. School of Tea and Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To solve the problem of grass-soil non-separation leading to weeds regrowth and debris fly-shot when the weeding machine is working in hilly mountainous areas, a weeding machine which separated weeds and soil with combination of throwing and pushing was designed. The weeding wheel with symmetrical spiral structure pushed the soil to both sides at low speed to avoid flying debris. The knife teeth threw the weeds backward to achieve weed-soil separation and prevented the resurgence of weeds. The shape and number of the teeth of weeding wheel were determined by theoretical analysis. The motion of the weeding wheel was analyzed in the weed-soil and debris-soil models, respectively. Coupled simulation by EDEM and ANSYS was performed to verify the working performance and physical properties of the weeding wheel. Through the field experiments, the optimal working parameters of the machine were 13 r/s of weeding wheel speed, 400 mm/s of forward speed, and 35 mm of weeding depth. With this working parameter, the average removal rate of the weeding machine was 86.7%. It was shown that the design of the weeding machine that separated weeds and soil with combination of throwing and pushing had a good operation quality and met the needs of weeding *Radix peucedani* in a hilly and mountainous environment with gravelly soil planting environment. The research result can enrich the theoretical basis of the mechanical weeding of *Radix peucedani* and provide a reference basis for similar studies.

Key words: *Radix peucedani*; weeding machine; combination of throwing and pushing; coupled simulation

0 引言

安徽省宁国市所种前胡药效高、品质好,作为地

理标志产物被冠以“宁前胡”美誉。宁前胡田地碎片化分布,地小坡陡,且土壤中参杂碎石,严重限制了中、大型除草机械的使用^[1-2]。前胡作为根茎类

药材,使用化学除草造成的农药残留会影响前胡药效甚至致毒。当前采用的人工除草存在工作强度高、效率低和成本高的问题。因此,迫切需要研发一款适用于丘陵山地环境,多碎石土壤的小型除草机械^[3-4]。

目前国内研究的除草机械工作对象多为大田作物和大型农场,不适用于宁前胡的坡地、碎片化农田。宁前胡作为典型的生长环境复杂、种植农艺特殊的特色经济作物,对除草机械设计有着较高要求^[5]。在丘陵山区多碎石土壤除草方面,武艳平^[6]研制一款烟田旋转除草工作部件,采用了在软轴上交替安装除草刀的结构,利用软轴的仿形功能在不规整的烟垄上进行除草的同时,可减小刀齿与碎石沙砾的撞击力度。指盘式除草机有诸多研究成果。指盘式除草机利用土壤的反作用力来驱动圆盘转动,指型齿将土壤撕裂从而除去行间杂草。除草耙不断滚动所以不会堵塞,但这种方法对土壤破坏较大,容易误伤作物根系^[7-12]。在作物残茬、茎秆多的复杂环境除草方面,韩豹等^[13]研制了一款行星梳齿式株间除草机构,利用平行四杆仿形机构限制梳齿入土角度,再通过两套弹性梳齿破开板结层,降低工作阻力并达到较好的除草效果。以上研究均可对不同的地形做出自适应调整,但并不能适应宁前胡窄行距、多碎石的田间状况。市场上常见除草机的除草轮转速在100~1 000 r/min之间^[14-17],其在作业时将杂草-土壤混合物共同抛出,而山间空气湿度高、温度低,土壤覆盖杂草根部导致杂草重新扎根,且除草机在多碎石土壤环境中工作时刀齿撞击碎石会造成碎石飞射,给前胡植株和操作人员带来极大的安全隐患。

综上,本文根据宁前胡生长的地理环境、土壤特性和种植农艺要求,设计一款抛推组合式草土分离宁前胡除草机。对称螺旋结构的除草轮使杂草和土壤分别向不同的方向运动,避免草土混合物的产生,杂草能够充分暴露在阳光下,解决杂草复生问题。同时土壤向两侧滑移,以避免碎石向后方飞射问题。

1 整机结构与工作原理

前胡多种植在陡坡上,土壤类型为红壤型扁砂土,所以前胡田含较多碎石,物理特性为松散且粘结力较小^[18]。地形限制了自走式除草机的使用,故研制一款适用于坡地的手持式除草机,为满足续航及动力要求,选用两冲程汽油发动机驱动。

1.1 整机结构

手持式宁前胡除草机整机结构如图1所示。作业时,操作人员背负汽油机,通过油门挡位

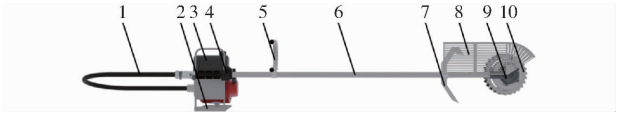


图1 除草机结构图

Fig.1 Structure diagram of weeder

1. 传动软轴 2. 背负机架 3. 汽油机 4. 油门把手总成 5. U形握把 6. 工作杆 7. 挡泥板 8. 护禾罩网 9. 蜗轮蜗杆减速器 10. 除草轮

调节除草轮转速,护禾罩网将前进方向及侧向的前胡拨开,除草轮进行除草作业。工作路径的土壤受到刀面法向推力的作用以滑移的形式向外侧运动,土壤与碎石混合物在内部摩擦力的作用下减小动能后堆积在前胡根部达到培土的效果,同时留下一条浅沟有利于排水。除草轮上的刀齿将杂草从根部钩出并抛向后方,以此达到将杂草与土壤分离的目的。挡泥板将杂草和被杂草带起的少量土壤挡下。

1.2 工作技术参数

整机动力由两冲程汽油发动机提供,传动系统由轴传动与齿轮传动组成。选择汽油发动机最高转速为7 500 r/min,怠速转速为3 600 r/min(即保持汽油发动机不熄火的最低转速)。根据实际的生产需求,选择蜗轮蜗杆减速器减速比为9.6:1。手持式宁前胡除草机主要设计技术参数如表1所示。

表1 除草机技术参数

Tab.1 Technical parameters of weeder	
参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 179×588×305
质量 m/kg	23
发动机额定转速 n/(r·min ⁻¹)	7 500
配套动力/W	1 600
除草幅宽/mm	90
除草深度/mm	0~40

2 除草轮设计

除草轮是除草机最关键的部件,主要结构如图2a所示。如图2b,在工作时,对称螺旋结构的刀轮能够将土壤推移到两侧,同时抵消推移土壤的反作用力。刀轮外沿的刀齿将杂草钩出并抛向后方,达到草土分离的作业效果。

2.1 工作环境与农艺要求

前胡田间杂草主要以牛筋草、千金子为主^[19],经调研,除草期时草高为50~230 mm,根系呈放射状展开,根深为4~33 mm,故除草深度应不小于35 mm。前胡为垄作条播作物,垄宽为800 mm,标准行距为280 mm,除草期为4—8月,需进行2~3次

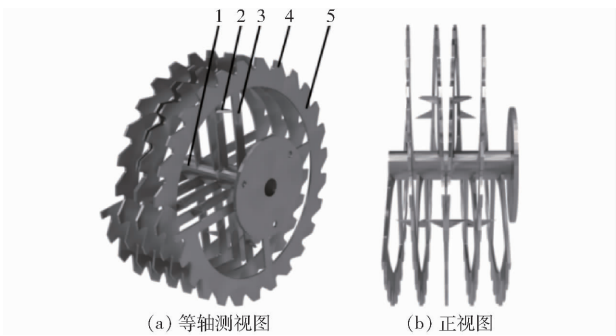


图2 除草轮结构示意图

Fig.2 Structure diagrams of weeding wheel

1. 轮轴 2. 防卷刀齿 3. 辐条 4. 刀齿 5. 刀轮

行间除草作业。

经过在宁国市宁前胡种植基地进行土壤调研,对随机选取的多处样本进行筛选分析,得出宁国市前胡种植实验田中,碎石直径在2~18 mm。

为满足作业时对前胡植株和根系的保护,同时达到符合要求的除草效果,选择除草轮的工作幅宽为90 mm。除草轮直径越大,除草效果越好,但同时能耗越大,查阅《农业机械设计手册》,选择除草轮直径为200 mm。

2.2 除草轮参数设计

刀轮为螺旋结构,田间碎石最大直径为18 mm,为避免碎石卡在刀轮间,故螺距应大于18 mm,取20 mm;刀片越薄,所受切削阻力越小、功耗越小,但在实际工作中需考虑到工作强度和应力,经查阅资料^[20],选取刀盘厚度为2 mm。

如图3所示,通过刀轮上开齿的方式,将杂草根系从土中钩出,在预定除草深度为40 mm时,刀具以逆时针转动的同时,机具向前进方向做水平运动。

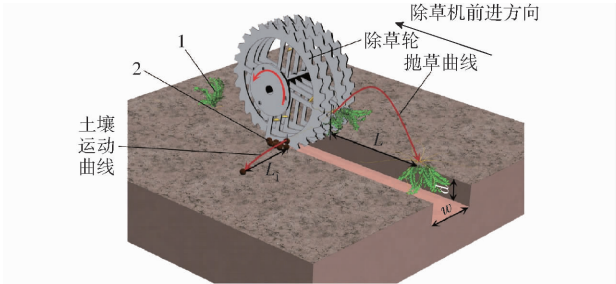


图3 除草轮工作原理图

Fig.3 Working principle of weeding wheel

1. 杂草 2. 土壤颗粒

如图4所示,以刀具入土点为原点O,地平线为x轴,机具前进方向的反方向为x轴正方向,地平线法线为y轴,向上为正方向。刀齿运动到点B时,开始将杂草钩出,故刃口所在直线与x轴正方向夹角应不超过90°,为避免滑切角对抛草运动的影响,故确定齿尖与轴心连线为刃口曲线。为保证杂草不在运动过程中脱齿,齿长 l_{od} 取1.5倍最大杂草直径^[21]。

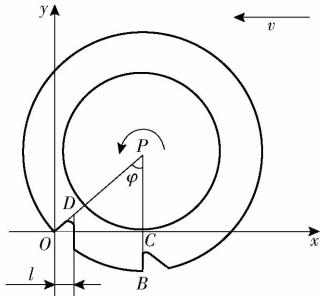


图4 刀齿破土示意图

Fig.4 Schematic of soil breaking by cutter teeth

为了保证在除草过程中不漏除,单片刀轮上所有刀齿连续入土时的有效除草距离总和需超出除草轮旋转一周时前进的距离,因此对刀轮上的齿数有要求^[22],其公式为

Zl ≥ v / n (1)

其中 l = cos(π/2 - φ) l_OD (2)

φ = arccos((l_PB - l_BC) / l_OP) (3)

- 式中 Z——齿数,个
l——单个刀齿入土时有效除草距离,mm
v——手持式除草机前进速度,mm/s
n——除草轮转速,r/s
l_OD——线段OD长度,mm
l_PB——线段PB长度,mm
l_BC——线段BC长度,mm
l_OP——线段OP长度,mm
φ——刀齿由点O运动到点B所转过的角度,(°)

则有 l = (l_OD * sqrt(l_OP^2 - (l_PB - l_BC)^2)) / l_OP (4)

发动机最高转速为7 500 r/min、怠速为3 600 r/min,故减速器减速后除草轮转速范围为6.7~13 r/s。手持式除草机前进速度主要受到操作员行走速度影响,故机具前进速度暂取400~800 mm/s^[23]。

使用Matlab对式(1)进行求解,获得图5所示的齿数范围图。求得Z ≥ 26.77,在实际加工过程中,刀齿由刀轮切割形成,刀齿增多会降低刀轮的强度,故齿数向上取最小整数为27。

在刀轮侧面焊接三角形防卷刀齿,在除草轮发生缠草时高速运动的防卷刀齿刃口将杂草切断向后抛出,为达到较高的锋利度并具有一定的耐磨性,材料采用40Mn,刃口做淬火处理。

2.3 除草轮-杂草运动分析

如图6所示,在刀齿运动到点O处开始抛草运动。

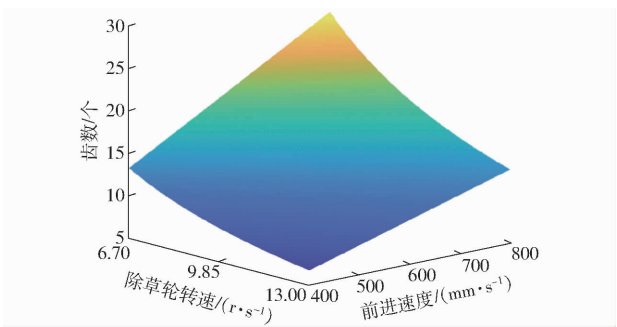


图 5 齿数范围曲面

Fig. 5 Surface graph of range of tooth number

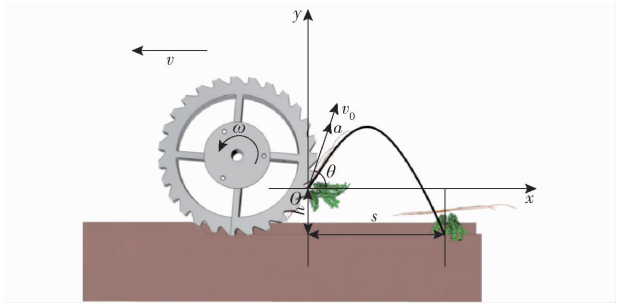


图 6 抛草运动示意图

Fig. 6 Schematic of grass throwing

杂草被钩出瞬间,杂草与刀齿发生非弹性碰撞,将杂草抛出,此时除草轮施加给杂草的加速度 a 在 y 方向上的分量应不小于重力加速度 g ,则有

$$n \geq \frac{\sqrt{gr\sin\theta}}{2\pi r\sin\theta} \quad (5)$$

式中 r ——除草轮半径,mm

θ ——抛射角, ($^\circ$)

除草轮除草作业时,不考虑空气阻力的情况下,此时杂草以初速度 v_0 做斜抛运动(如图 6 所示),抛射角为 θ ,根据点的运动合成公式,可将抛出时齿尖端速度 v_0 分解为

$$\begin{cases} v_{0x} = -v - \omega r \cos(\omega t) \\ v_{0y} = \omega r \sin(\omega t) \end{cases} \quad (6)$$

式中 ω ——除草轮旋转角速度,rad/s

t ——除草轮旋转时间,s

v_{0x} —— x 轴方向上除草轮合速度,mm/s

v_{0y} —— y 轴方向上除草轮合速度,mm/s

杂草离开刀齿后受重力 G 减速下落,落点距抛出点为抛物距离 s ,此过程中运动时间为 t 时的瞬时速度 v_i 分解为

$$\begin{cases} v_{ix} = \omega r \cos\theta - v \\ v_{iy1} = \omega r \sin\theta - gt \quad \left(t < \frac{2\omega r \sin\theta}{2g}\right) \\ v_{iy2} = gt \quad \left(t \geq \frac{2\omega r \sin\theta}{2g}\right) \end{cases} \quad (7)$$

杂草运动轨迹方程为

$$y = x \tan\theta - \frac{gx^2}{2(\omega r \cos\theta)^2} \quad (8)$$

抛草距离 s 为

$$s = v_{0x}(T_1 - T_2) \quad (9)$$

式中 T_1 ——杂草在第一象限运动时间,s

T_2 ——杂草在第四象限运动时间,s

又有

$$\begin{cases} T_1 = \frac{-\omega r \sin\theta + \sqrt{(\omega r \sin\theta)^2 - 2gh}}{g} \\ T_2 = \frac{2\omega r \sin\theta}{g} \end{cases} \quad (10)$$

式中 h ——抛出点与落地点的绝对高度差,mm

代入式(9),则

$$s = \frac{(\omega r \cos\theta - v) [\sqrt{(\omega r \sin\theta)^2 - 2gh} + \omega r \sin\theta]}{g} \quad (11)$$

本机具采用刀盘正转除草,即刀轴转动方向与机具前进方向相反,单个刀齿在水平方向上的分速度会抵消一部分机具前进速度,降低除草效果,机具前进速度 v 与除草轮线速度 v_0 的比值称为转速比 λ 。当 $\lambda < 1$ 时,刀片可以正常除草;当 $\lambda = 1$ 时,刀具无法除草;当 $\lambda > 1$ 时,刀具推土而无法正常除草。

2.4 除草轮-土壤运动分析

将土壤中的碎石、沙砾简化为刚体颗粒,对除草深度内任一半径 R 处颗粒 M 与除草轮进行运动分析。图 7 为仰视简图。除草轮以角速度 ω 旋转时,颗粒 M 受刀轮切向摩擦力和法向推力作用,产生的切向速度和法向速度用速度三角形法则合成合速度 v_h 。 v 受摩擦力影响与法向速度偏移的摩擦角为 β 。

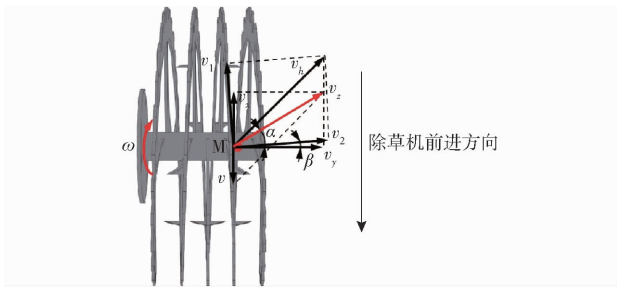


图 7 土壤运动示意图

Fig. 7 Schematic of soil movement

颗粒 M 同时受到机具前进速度 v 影响, v 与 v_h 用速度三角形法则求解得最终速度 v_z 。对 v_z 进行分解,可得到分速度 v_x 与 v_y [24-25] 为

$$\begin{cases} v_x = v \cos(\alpha + \beta) \\ v_y = v \sin(\alpha + \beta) - v_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中 α ——螺旋升角, ($^\circ$)

β ——摩擦角, ($^\circ$)

其中

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{S}{2\pi R} \\ \beta = \arctan \mu \end{cases} \quad (13)$$

式中 S ——螺距,mm
 μ ——土壤颗粒 M 与刀轮的摩擦因数
 v_y 即为最终土壤受到除草轮作用的有效运动速度。

3 仿真分析

除草轮作为除草机最主要工作部件,在工作中受到的应力和发生的应变是影响其工作效果和使用寿命的重要因素之一,为验证作业过程中除草轮对土壤的作用效果、获取除草轮所受的应力以便进行结构强度校核,对除草轮进行离散元与有限元耦合仿真。

3.1 耦合仿真

运用 EDEM 软件预处理模块建立土槽实体和土壤颗粒模型,表 2 为根据前期实地采集和查阅文献得到的土壤参数。

表 2 土壤参数 Tab.2 Soil parameters	
参数	数值
土壤容重 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.81×10^3
剪切模量/Pa	1×10^6
泊松比	0.35
沙土间恢复系数	0.6
沙土间静摩擦因数	0.5
沙土间滚动摩擦因数	0.5

在土槽实体上方建立土壤颗粒工厂并生成土壤颗粒。导入除草轮三维模型进行定位,添加移动副和转动副^[26],同时设定表 3 所示参数。

表 3 土壤-刀具参数 Tab.3 Soil – tool parameter	
参数	数值
剪切模量/Pa	8.27×10^4
泊松比	0.28
土刀之间恢复系数	0.5
土刀之间静摩擦因数	0.5
土刀之间滚动摩擦因数	0.05

将当前参数组合下,刀具所受阻力的数据集导出为 ANSYS Workbench data。使用 ANSYS 软件中的 Workbench 模块,创建 Geometry 项目并导入除草轮 stl 格式模型,创建 EDEM 项目并导入 ANSYS Workbench data 数据集,创建 static structural 项目,在 Engineering Data 中对 45Mn 材料属性定义为:密度 $8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、泊松比 0.28、抗拉强度 620 MPa、屈

服强度 375 MPa、弹性模量 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。在 3 个项目中建立图 8 所示链接。

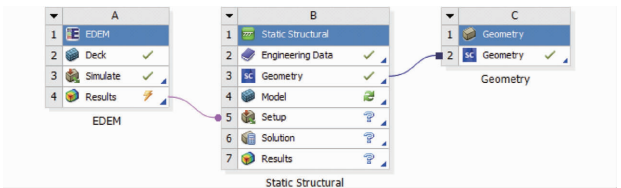


图 8 项目链接图
Fig.8 Project link diagram

在 Model 预处理中采用三面体网格单元对模型进行网格划分,在除草轮上选定施加应力区域并导入载荷,同时对刀具进行约束。在求解方案中插入总形变量、等效弹性应变和等效应力,并对其进行求解。

3.2 仿真结果与分析

仿真结束后土壤颗粒变化情况如图 9 所示。如图 9a 所示,将土壤颗粒依据厚度分层渲染色彩,根据除草轮作业范围建立网格空间,统计土壤颗粒数变化如图 9b 所示。图 9a 中除草轮作业轨迹两侧较为集中的红色区域为土壤滑移到两侧堆积的结果,中间形成了一条明显的绿色沟槽,此现象表明工作过程中除草轮将表层土壤翻动并向两侧产生了滑移,而且由于土壤颗粒之间接触力的作用,土壤颗粒并未形成飞溅,以滑移形式堆积在两侧。

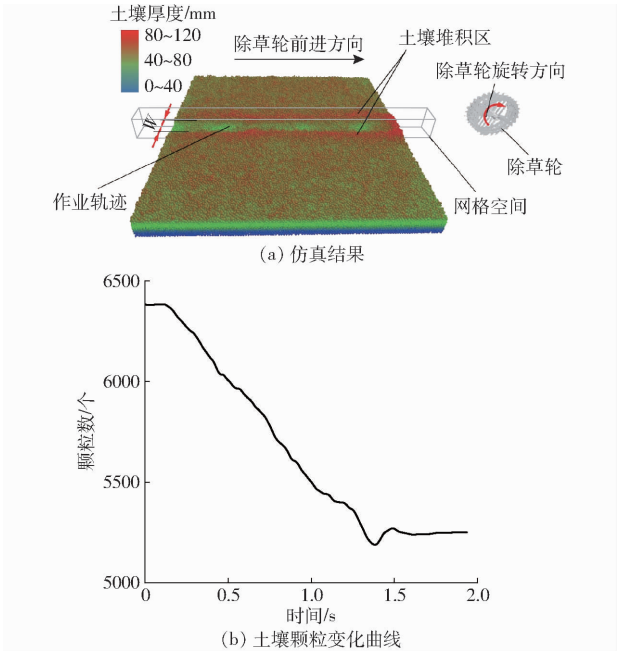


图 9 EDEM 仿真结果
Fig.9 Simulation results of EDEM

由图 10a 可知,最大位移形变量为 0.940 3 mm,主要分布在刀刃螺旋末端外缘刀齿处,原因是此处位于最末端,距离中心两刀片连接处最远,在工作时除草轮转动将土推移向两侧时,刀面法向受到移土

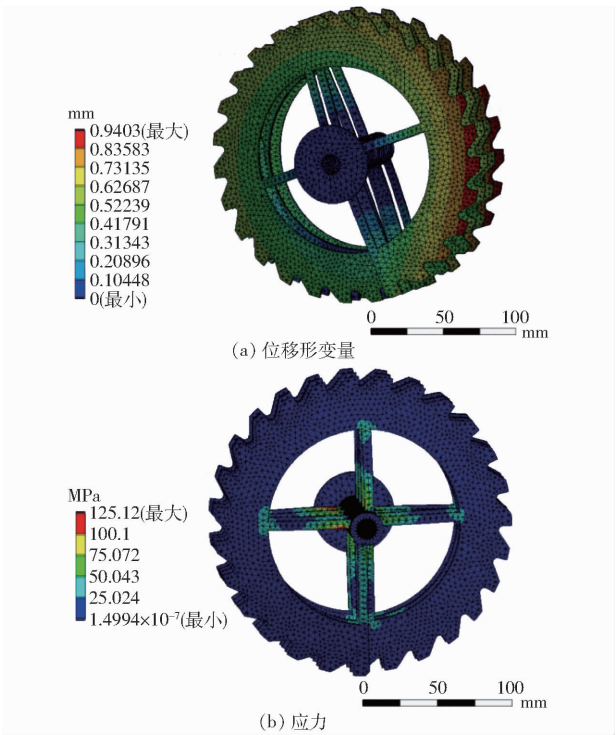


图 10 ANSYS 仿真结果

Fig. 10 Simulation results of ANSYS

反作用力较大,产生形变最为明显^[27]。但是从数值来看最大变形量仍然较小,且 45Mn 具备较好的韧性,相较于整体而言可忽略不计。

由图 10b 可知,除草轮在工作过程中所受到的应力最大处为辐条两端,辐条作为连接刀轮与刀轴的零件,在工作过程中受到较大的扭矩,同时承受刀轴的主动力与刀轮受阻后的反作用力,故连接处为应力集中现象较为明显,最大应力为 125.12 MPa。

通过对除草轮的离散元和有限元分析可知,抛推组合式草土分离除草轮能够实现将土壤向两侧推移的目的;在正常工作过程中,所受阻力不会对除草轮造成塑性形变,除草轮位移形变量在正常范围内;除草轮工作时应力集中处最大应力为 125.12 MPa,小于 45Mn 的屈服强度 375 MPa。因此,选用 45Mn 作为除草轮的材料,能够满足工作要求。

4 整机试验

4.1 试验场地及条件

为验证抛推组合式草土分离除草机的工作性能,进行田间试验验证,确保符合设计预期要求。2022 年 8 月 3 日在安徽省宁国市胡乐镇竹川村宁前胡种植基地进行田间试验。前胡品种为白花前胡,播种后 141 d,距上一次除草 59 d,前胡植株行距 280 mm,叶展直径 244 mm,根深 50 ~ 230 mm,杂草主要种类为牛筋草,根系呈放射状展开,根深为 4 ~

35 mm,杂草密度为 48 棵/m²,操作人员技术熟练,机器状况良好,如图 11 所示。除草前后对比如图 12 所示。



图 11 试验现场

Fig. 11 Test site environment

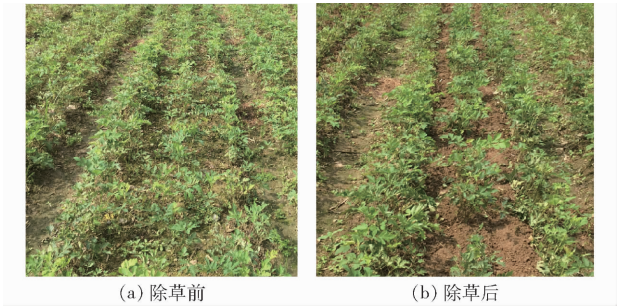


图 12 除草前后对比

Fig. 12 Comparison before and after weeding

图 13 为除草轮工作时的草土分离效果图。从图 13 可以看出,除草轮在旋转过程中,土壤被除草轮推向两侧,杂草被刀齿钩出,抛向后方。此现象说明设计的抛推组合式除草刀具能够实现草土分离,有效避免草土混合物的产生。



图 13 草土分离效果

Fig. 13 Effect picture of grass soil separation

4.2 试验设计与结果分析

以除草深度、除草机前进速度和除草轮转速为试验因素,以除净率为指标设计三因素三水平正交试验,除净率计算公式为

$$P = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times 100\% \tag{14}$$

式中 P ——除净率, %
 N_1 ——除草前测试区域内杂草总数, 棵
 N_2 ——除草后测试区域内杂草总数, 棵

使用 Design-Expert 12 软件进行优化,各因素编码如表 4 所示。试验结果如表 5 所示。表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 4 试验因素编码
Tab.4 Experiment factors codes

编码	因素		
	除草轮转速/ ($\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$)	前进速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	除草深度/ mm
-1	7	400	25
0	10	600	35
1	13	800	45

表 5 正交试验结果
Tab.5 Results of orthogonal

序号	因素			除净率/%
	X_1	X_2	X_3	
1	1	0	-1	79.10
2	1	0	0	82.50
3	1	1	0	79.92
4	0	1	-1	64.20
5	0	-1	-1	72.16
6	-1	1	0	58.85
7	1	0	1	80.45
8	-1	0	1	64.20
9	-1	0	-1	60.10
10	-1	-1	0	67.38
11	0	0	0	69.15
12	0	-1	0	74.53
13	0	-1	1	73.20
14	0	0	0	70.05
15	0	1	0	67.00
16	1	-1	0	86.72
17	0	1	1	65.20

由表 5 可知,在除草轮转速为 13 r/s、前进速度为 400 mm/s、除草深度为 35 mm 时,除净率最高,为 86.72%。

使用 ANOVA 模块对试验数据进行方差分析,获取各因素与指标的关系如表 6 所示。

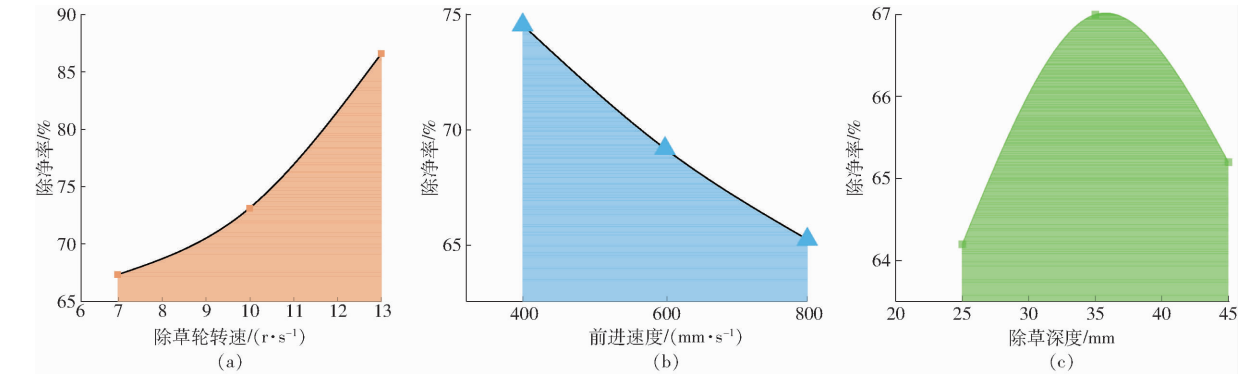


图 14 影响趋势图

Fig.14 Impact trend charts

表 6 方差分析

Tab.6 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	858.5	9	95.39	41.33	<0.000 1
X_1	715.55	1	715.55	310.02	<0.000 1
X_2	94.81	1	94.81	41.08	0.000 4
X_3	17.7	1	17.7	7.67	0.027 7
X_1X_2	0.748 2	1	0.748 2	0.324 2	0.586 9
X_1X_3	1.89	1	1.89	0.819 1	0.395 5
X_2X_3	3.44	1	3.44	1.49	0.261 6
X_1^2	11.05	1	11.05	4.79	0.064 9
X_2^2	0.851 7	1	0.851 7	0.369	0.562 7
X_3^2	13.72	1	13.72	5.95	0.044 9
残差	16.16	7	2.31		
失拟	4.67	3	1.56	0.542 1	0.678 9
误差	11.49	4	2.87		
总和	874.65	16			

由表 6 可知,回归项 X_1 、 X_2 的 P 值小于 0.01,表明其对模型的响应极显著, X_3 的 P 值大于 0.01、小于 0.05,表明其对模型的响应显著,对响应结果进行多元回归拟合分析,可以得到回归方程模型为

$$Y = 71.15 + 9.46X_1 - 3.44X_2 + 1.49X_3 + 0.4325X_1X_2 - 0.6875X_1X_3 + 0.9275X_2X_3 + 1.62X_1^2 + 0.4497X_2^2 - 1.81X_3^2 \quad (15)$$

为确定除草机的最佳工作参数,结合优化目标与影响因素边界条件,建立优化模型为^[28]

$$\begin{cases} \max Y(X_1, X_2, X_3) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

优化求解得到的除草机最佳工作参数为:除草轮转速 13 r/s、前进速度 400 mm/s、除草深度 34.66 mm,预测除净率为 85.69%。

通过控制变量法提取表 6 中的数据进行分析,可以获取三因素分别对除净率的影响趋势如图 14 所示。

由图 14a 可知,除草轮转速越高除净率越高,其原因是在除草轮钩起杂草时,除草轮的转速越高,杂草的速度和两侧被推移土壤的速度越快,则破碎土壤与杂草混合的时间越短且杂草被抛出时的动能越大,易于草、土分离。由图 14b 可知,除草机前进速度越快除净率越低,原因是前进速度越慢,除草轮的切土节距越小,除草轮对单位土壤的作业时间越长,所以除净率高,但切土节距不能过小,否则会降低作业效率。由图 14c 可知,除草深度在由 25 mm 增加到 35 mm 时除净率增高,由 35 mm 增加到 45 mm 时除净率降低。其原因是随着除草深度的增加,除草轮越过草根最大深度,向两侧推土量增加,且土壤对除草轮摩擦力急剧增大,降低除草轮实际转速,导致除草率下降。

结合模型优化结果,以除草轮转速 13 r/s、前进速度 400 mm/s、除草深度 35 mm,重复 6 次试验,得到平均除净率为 86.7%,优化方案与田间试验具有极高的拟合程度,符合试验要求。

5 结论

(1)设计了一种抛推组合式草土分离除草机,该除草机由背负式二冲程汽油发动机提供动力,采

用软轴传动便于操作,二级传动增加扭矩,采用抛推组合式除草刀具进行高效率除草。该机的特点是单行作业,适合地形多,安全性高,除草效率高。

(2)除草部件为带有刀齿的对称螺旋结构除草轮,对除草轮的结构进行分析,得到刀齿最佳排列个数,对刀齿形状参数进行设计,并使用离散元与有限元耦合仿真对主要工作部件除草轮进行强度校核,得到除草机理论所受最大载荷为 125.12 MPa,小于 45Mn 的屈服极限。

(3)通过田间试验,验证了抛推组合式除草刀具在工作时能够将土壤与碎石混合物推向两侧,同时将杂草抛向后方,能够有效避免草土混合物的产生。

(4)对除草机进行三因素三水平田间正交试验,得到除草轮转速和机器前进速度分别与除净率之间的线性变化规律;除草轮除草深度与除净率之间呈抛物线的函数变化规律。田间正交试验获得机具的最佳工作参数为:除草轮转速 13 r/s、前进速度 400 mm/s、除草深度 35 mm。经重复试验测试,平均除净率为 86.7%。设计的抛推组合式草土分离除草机作业质量良好,符合丘陵山地环境下,多碎石土壤种植环境的宁前胡除草需求。

参 考 文 献

[1] 陈星. 宁前胡生物学特征及人工栽培技术研究[J]. 安徽农学通报,2017,23(15):116-118.
CHEN Xing. Research on the biological characteristics and artificial cultivation techniques of Ningqianhu[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2017,23(15):116-118. (in Chinese)

[2] 史婷婷,张小波,张珂,等. 基于多源多时相遥感影像的宁国前胡种植面积提取研究[J]. 中国中药杂志,2017,42(22):4362-4367.
SHI Tingting,ZHANG Xiaobo,ZHANG Ke,et al. Study of extracting *Peucedanum praeruptorum* planted area in Ningguo of Anhui Province based on multi-source and multi-phase image[J]. China Journal of Chinese Materia Medica,2017,42(22):4362-4367. (in Chinese)

[3] 李翠芬,张久胜. 前胡仿野生栽培技术探讨[J]. 亚太传统医药,2014,10(3):41-42.
LI Cuifen ZHANG Jiusheng. Discussion on the techniques of imitating wild *Peucedani radix* cultivation[J]. Asia-Pacific Traditional Medicine,2014,10(3):41-42. (in Chinese)

[4] 李芸芸,潘雅楠,郭婷婷,等. 不同产地前胡药材规格等级的质量特征研究[J]. 中国医药导报,2020,17(10):26-30.
LI Yunyun,PAN Ya'nan, GUO Tingting, et al. Study on quality characteristics of specification grade of *Radix Peucedani* medicinal materials in different producing areas[J]. China Medical Herald,2020,17(10):26-30. (in Chinese)

[5] 娄帅帅,曹成茂,丁冉,等. 自走式前胡除草机的设计与试验[J]. 农机化研究,2017,39(9):91-97,106.
LOU Shuaishuai,CAO Chengmao,DING Ran,et al. Design and experiment of self-propelled forecourt weeding machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(9):91-97,106. (in Chinese)

[6] 武艳平. 烟田旋转除草工作部件及控制系统的设计与研究[D]. 重庆:西南大学,2021.
WU Yanping. Design and research of rotary weeding working parts and control system in tobacco field[D]. Chongqing:Southwest University,2021. (in Chinese)

[7] DAWKHAR R K,PAWAR B D,SANGALE G S,et al. Agrobased weeding machine[J]. IJARIII, 2021(4):624-632.

[8] MACHLEB J,PETEINATOS G,GERHARDS R,et al. Sensor-based intrarow mechanical weed control in sugar beets with motorized finger weeders[J]. Agronomy,2021,11(8):1517.

[9] RICHARD D, LEIMBROCK-ROSCHE L, KEßLER S,et al. Impact of different mechanical weed control methods on weed communities in organic soybean cultivation in Luxembourg[J]. Organic Agriculture, 2020,10(Supp. 1):1-14.

[10] 李燕. 滚齿式株间除草机构的设计与仿真[D]. 北京:北京林业大学,2013.
LI Yan. Design and simulation of hobbing type inter plant weeding mechanism[D]. Beijing:Beijing Forestry University,2013. (in Chinese)

- [11] 韩豹,杨亚楠,王宏伟,等. 苗间除草部件入土深度 PID 自动控制系统设计与台架试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):68-77.
HAN Bao,YANG Ya'nan,WANG Hongwei,et al. Design of PID automatic control system for depth into earth of intra-row weeding components and its bench experiment[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(11):68-77. (in Chinese)
- [12] ABDULLAH A, NURUL A K, MD A H,et al. 3 In 1 disc ridger:development of an improved implement for sweet potato plant-bed making,fertilizing and mechanical weeding[J]. Advances in Agricultural and Food Research Journal, 2021,2(2):a0000170.
- [13] 韩豹,郭畅,高英玲,等. 大豆株间除草单体机构及关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):112-121.
HAN Bao,GUO Chang,GAO Yingling,et al. Design and experiment of soybean intra-row weeding monomer mechanism and key components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(6):112-121. (in Chinese)
- [14] 孙文龙. 小型半轴式除草机的设计及试验研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.
SUN Wenlong. Design and experimental study of small semi axle weeder[D]. Changsha:Central South University of Forestry and Technology,2019. (in Chinese)
- [15] 马熙. 蔬菜窄行距微耕除草机的改进设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
MA Xi. Improved design of narrow row spacing weeding machine for vegetables[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
- [16] 贾瑞昌,方奕,孔祥锤. 手推式电动除草机设计与试验[J]. 农业工程,2018,8(3):99-101.
JIA Ruichang,FANG Yi,KONG Xiangchui. Design and test of electric trolleying weeding machine[J]. Agricultural Engineering,2018,8(3):99-101. (in Chinese)
- [17] 赵超凡. 玉米液态追肥除草机设计与试验[D]. 保定:河北农业大学,2021.
ZHAO Chaofan. Design and test of weeding machine for corn liquid top dressing[D]. Baoding:Hebei Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [18] 王果. 土壤学[M]. 北京:高等教育出版社,2009:229-240.
- [19] 方梁菲,曹成茂,秦宽,等. 导种环槽 U 型孔组合型轮式前胡排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(4):21-32,51.
FANG Liangfei,CAO Chengmao,QIN Kuan,et al. Design and experiment of wheel seed metering device with guide ring groove combining U-hole for *Radix peucedani*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):21-32,51. (in Chinese)
- [20] 黄小龙,刘卫东,张春龙,等. 苗间锄草机器人锄草刀优化设计[J]. 农业机械学报,2012,43(6):42-46.
HUANG Xiaolong,LIU Weidong,ZHANG Chunlong,et al. Optimal design of rotating disc for intra-row weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(6):42-46. (in Chinese)
- [21] 汪志杰. 基于挖掘阻力的土壤等级辨识与最佳入土角的研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2015.
WANG Zhijie. Study on soil grade identification and optimal angle of penetration based on excavation resistance[D]. Changsha:Hunan Agricultural University,2015. (in Chinese)
- [22] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):102-109. (in Chinese)
- [23] 胡梦柯. 前胡除草机械的研制与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2019.
HU Mengke. Development and test of *Peucedanum* weeding machine[D]. Hefei:Anhui Agricultural University,2019. (in Chinese)
- [24] 史宇亮,陈新予,陈明东,等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(10):16-25.
SHI Yuliang,CHEN Xinyu,CHEN Mingdong,et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):16-25. (in Chinese)
- [25] 郑侃,李宇飞,夏俊芳,等. 开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向匀土刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):63-73.
ZHENG Kan,LI Yufei,XIA Junfang,et al. Design and experiment of land leveling blade roller of ditching and rotary tiller with gradual spiral angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(5):63-73. (in Chinese)
- [26] 胡建平,潘杰,陈凡,等. 基于 EDEM-RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):75-85,301.
HU Jianping,PAN Jie,CHEN Fan,et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM-RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):75-85,301. (in Chinese)
- [27] 张冲,范旭辉,李明森,等. 基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 2):52-59.
ZHANG Chong,FAN Xuhui,LI Mingsen,et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 2):52-59. (in Chinese)
- [28] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(7):60-71.
LAI Qinghui,JIA Guangxin,SU Wei,et al. Design and test of ginseng precision special-hole type seed-metering device with convex hull[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):60-71. (in Chinese)