doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.012

铺膜插秧后水田 3SCJ－1 型除草机设计与试验

王金武　李　超　李　鑫　李　响　王金峰
（东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030）

摘要：为实现铺膜插秧种植方式的有机水稻全程绿色无污染化作业，解决地膜两侧单行内杂草难以根除的问题，根据农艺要求，设计了一种针对铺膜插秧后除草作业的 3SCJ－1 型单行水田除草机。阐述了基本结构组成和工作原理，分析了除草部件的运动学与动力学特征，建立了除草部件、机架与仿形浮漂整体的力学模型，推导出除草机的驱动扭矩。以机器前进速度和除草深度为试验影响因素，除草率作为评价指标，对除草性能进行单因素田间试验，并运用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行分析，得到影响因素与评价指标之间的数学模型。试验结果表明：当机器前进速度从 0.3 m/s 增大至 0.6 m/s 时，除草率先增大后减小，并在前进速度为 0.45 m/s 时，除草率达到最大值（78.52%）；当除草深度从 50 mm 增大至 110 mm 时，除草率持续增大，但考虑到除草机的功耗，最佳除草深度取为 50～100 mm，在除草深度为 100 mm 时，除草率为 79.26%。除草机平均除草率为 78.02%，满足铺膜插秧种植方式水田除草的农艺要求。

关键词：有机稻；水田；除草机；铺膜插秧；试验
中图分类号：S224.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2018)04-0102-08

Design and Experiment of 3SCJ－1 Type Weeding Machine for Paddy Field Applied to Film Mulching and Transplanting

WANG Jinwu　LI Chao　LI Xin　LI Xiang　WANG Jinfeng
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Rice mulching and transplanting technology is a great innovation in organic rice cultivation. It has many advantages such as temperature-increasing, water-holding, fertilizer-maintaining, improving physical and chemical properties, raising fertility, reducing weed growth, alleviating disease, increasing yield and so on. There are many researches about paddy weeding machine around the world, however, there is no mature weeding machine for mulching rice in paddy field. A new type of 3SCJ－1weeding machine was designed by using new weeding components for transplanting rice of organic rice. The motor power of the machine was provided by a two-stroke engine, which consisted frame, power transmission system, floater and compound weeding components, including walking wheel and weeding device. It achieved pulling and bury-pressing on weeds through the rotation of weeding device, kinematics and dynamics analysis of the weeding device were carried out at the same time. In June 2017, experiments were conducted in Wuchang by taking the forward speed and weeding depth as variables, and taking weeding rate as index. The results showed that when the forward speed was increased from 0.3 m/s to 0.6 m/s, the weeding rate was increased first and then decreased, and the weeding rate reached the maximun, which was 78.52% at the forward speed of 0.45 m/s; when the weeding depth was ranged from 50 mm to 110 mm, the weeding rate was increased continuously, however, considering the power consumption of weeding machine, the best weeding depth was 50～100 mm, and the weeding rate reached 79.26% at the weeding depth of 100 mm, the average weeding rate of the weeding machine was 78.02%, which could satisfy the weeding agronomic requirements of mulching paddy field.

Key words: organic rice; paddy field; weeding machine; mulching and transplanting; experiment

收稿日期：2017－08－03　修回日期：2017－11－16
基金项目：国家现代农业产业技术体系岗位科学家项目（CARS－01－44）和黑龙江省现代产业技术协同创新体系岗位专家项目
作者简介：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
通信作者：王金峰（1981—），男，教授，主要从事田间机械研究，E-mail：jinfeng_w@126.com

0　引言

水稻机械铺膜插秧技术是稻作栽培的一项创新技术。机械铺膜插秧技术与有机水稻传统种植方式相比，具有减少水分蒸发、抑制杂草生长、增加土壤肥力、提高作业效率等优势，是生产有机稻米的重要途径之一[1－3]。近年来，机械除草已经成为生产有机水稻的一项关键措施。机械除草是一种无污染的除草方式，具有增加氧气、提高地温、利于秧苗生长等优势[4－5]。

目前国内外针对铺膜插秧种植方式的除草机械尚不多见，市场上出现的除草机械主要是针对普通插秧种植方式秧苗标准行距为 300 mm 的水田。水田乘座式中耕除草机主要有日本三菱农机的 LVW－8 型[6]、和实产业的 RW50 型[7]以及洋马的 SJVP 型；而步进式除草机有和同产业生产的 MSJ－4 型[8]和美善研制的 SMW[9－10]等机型。这两类除草机都存在田间转向时压苗严重且伤苗率较高等现象。国内的水田除草机主要有王金武等[11]研制的 3ZS－150 型步进式水田中耕除草机，吴崇友等[12]研制的 2BYS－6 型乘座式水田中耕除草机，以及延吉市农机推广中心研制的 3ZS－1 型水田中耕除草机[13]。国内外主要针对等行距的农艺除草方式进行除草机设计，并且除草部件大多采用主动或随动耙齿形式，结构单一且除草效率相对较低。

基于以上分析，本文设计一种满足铺膜插秧种植方式除草要求且转向灵活、轻便的单行除草机。除草部件采用回转刀盘和旋转板齿混合式结构。通过对单行除草机的关键部件设计及其运动学、动力学分析，获得合理的机具结构技术参数，通过田间试验获得最佳的工作参数范围，以更好地满足铺膜插秧种植方式除草作业的要求。

1　铺膜环境与农艺要求

铺膜插秧种植方式的水田环境是由稻苗、杂草、土壤、水、地膜等多种物质耦合的环境。如图 1 所示，水稻田共分为 3 层，从上往下依次为地膜层、泥浆层和泥土层[14]，其中泥浆层的深度为 20 ~ 40 mm，而泥土层的深度为 170 ~ 240 mm。为了方便后期的田间管理以及人工揭膜，铺膜插秧机作业后，相邻 2 个作业单元（1 个作业单元为 6 行）秧苗的行距为 500 mm，地膜分别向作业单元两侧行间延伸 100 mm，有效除草区域为 300 mm。泥脚深度为 170 ~ 240 mm，铺膜插秧 7 d 后，秧苗的根系深度为 80 ~ 100 mm，而稗草的根系深度仅为 30 ~ 50 mm。根据农艺除草要求[15－17]，除草时间分别为铺膜插秧后的 7 d 和 21 d。

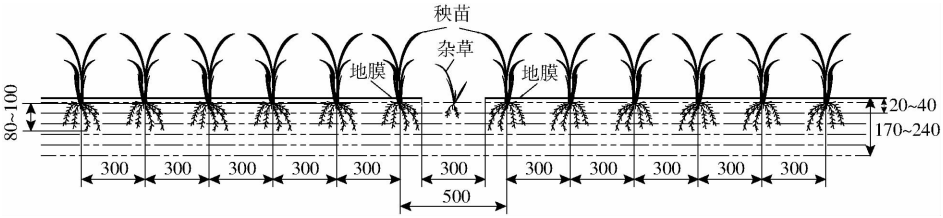


图 1　铺膜插秧稻田土壤简图

Fig. 1　Structure diagram of rice mulching and transplanting paddy soil

2　机具结构与工作原理

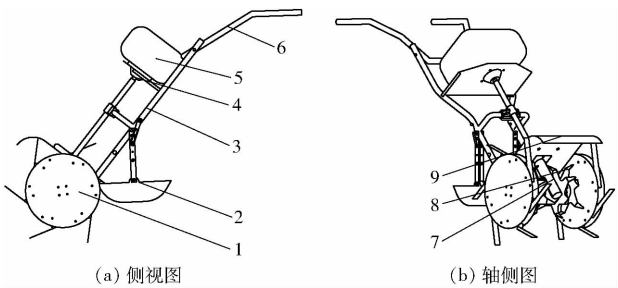
2.1　整机结构布局

针对铺膜插秧种植方式设计的水田单行除草机，结构如图 2 所示。该除草机以二冲程汽油机为动力，采用二级传动方式，其中一级传动为离合摩擦环传动，蜗轮蜗杆传动为二级传动。整机由行走轮、仿形浮漂、挡泥板、机架、发动机、摩擦离合总成、扶手、除草刀盘、蜗轮蜗杆减速器等部件组成。

单行除草机的结构设计应符合铺膜插秧种植方式除草的农艺要求。单行除草机的主要技术参数如表 1 所示。

2.2　除草原理

单行除草机由发动机提供作业动力，动力经减速器传递至蜗轮轴，蜗轮轴作圆周转动。除草部件通过套筒铰接在蜗轮轴上。机具工作前，根据除草



(a) 侧视图　　(b) 轴侧图

图 2　单行除草机结构简图

Fig. 2　Structure diagrams of single row paddy weeding machine

1. 行走轮　2. 仿形浮漂　3. 机架　4. 摩擦离合总成　5. 发动机　6. 扶手　7. 除草刀盘　8. 减速箱　9. 挡泥板

表 1 单行除草机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of single row weeding machine

参数	设计值/方式
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	900×300×1 200
配套动力/kW	2.5
整机质量/kg	30
传动方式	离合摩擦环传动/蜗轮蜗杆传动
除草方式	除草部件膜间除草
工作效率/($hm^2 \cdot h^{-1}$)	>0.35
除草率/%	≥75

深度的要求,调节仿形浮漂的高度以保证除草深度。机具工作时,机具以一定速度前进,利用发动机提供动力输出,通过传动系统把动力传递给除草部件。

图 3 中 r_1 为除草刀盘的半径;r_2 为旋转板尺的最大回转半径;h_2 为除草部件中心与泥浆层表面的高度。对秧苗、杂草(稗草为主)物理特性的研究可知,秧苗主要由主根和次生根组成[18-19]。除草期间由于杂草(稗草为主)未进入分蘖期且主根较为脆弱,故作业时杂草(稗草为主)受到除草刀盘的旋切作用或者受到行走轮埋压拉拔作用而被挑出土壤或者被切断抛离土壤,如图 3 所示。

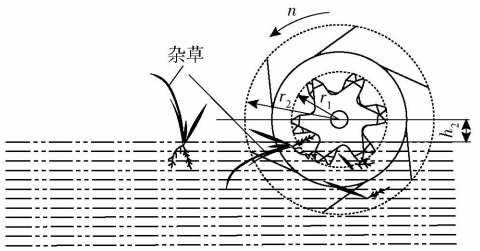


图 3 除草部件工作简图

Fig. 3 Working sketch of weeding components

3 关键部件设计

3.1 除草部件结构设计

除草部件作为除草机的关键部件之一,对除草机的除草性能有着重要的影响。除草部件主要由旋切作用的除草刀盘以及同时具有埋压拉拔杂草和行走功能的行走轮组成,如图 4 所示。

设计了一种带有弯折弹齿的新型除草刀盘,如图 4 所示。由于除草刀盘并不具有行走功能,因此满足其除草功能的同时尽量减小其与土壤之间的阻力。考虑到除草深度,设计除草刀盘的最大回转直径为 220 mm,为满足膜间间隙 300 mm 的要求,设计为 4 个除草刀盘横向排列,单个除草刀盘的横向宽度为 40 mm。除草刀盘的厚度太大,浪费材料同时增加机器重量,厚度太小,可能造成强度不够,易发生变形,综合考虑除草刀盘厚度选为 2 mm。

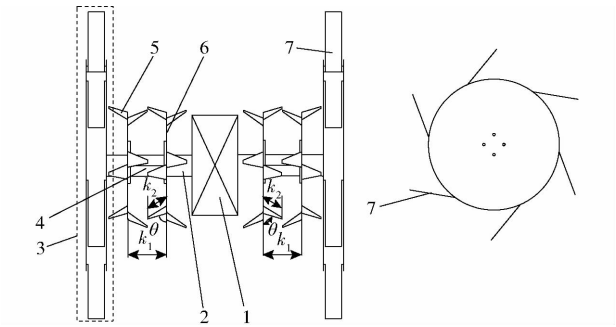


图 4 除草部件结构简图

Fig. 4 Structure diagram of weeding components

1. 减速器 2. 蜗轮轴 3. 行走轮 4. 连接件 5. 弯折弹齿 6. 除草刀盘 7. 除草板齿

为了实现单个除草刀盘最大化除草作业的同时,使蜗轮轴两端轴承所承受的侧向压力较为平衡,弯折弹齿采用双侧倾斜方式布置使其尽可能交错入土,如图 5 所示。除草刀盘上弯折弹齿倾斜角 θ 的取值应考虑是否存在漏除现象,当弯折弹齿既不漏除也不重复除草时如图 5 所示。

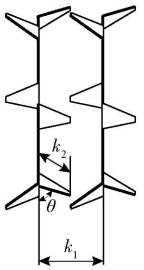


图 5 相邻除草刀盘位置图

Fig. 5 Position diagram of adjacent weeding device

θ 应满足

$$\theta = \arcsin \frac{k_1}{2k_2} \tag{1}$$

式中 θ——弯折弹齿的弯折角度,(°)

k_1——相邻除草刀盘间隙,mm

k_2——单个弯折弹齿的长度,mm

除草膜间距为 300 mm,选配的减速器宽度为 120 mm,双侧的行走轮宽度为 40 mm,相减得到单侧的相邻除草的间隙为 50 mm。弯折线(刀盘上弯折处长度)较短时,弯折加工难度较大且会出现漏除现象;弯折线较长时,弯折弹齿长度太长与土壤作用深度较深,阻力较大,功耗较大且会出现相邻刀盘内淤泥堵塞的现象。综合考虑在弯折线长度为 30 mm 处进行弯折加工,继而得到弯折弹齿的长度 k_2 为 28.8 mm。将 k_1=50 mm、k_2=28.8 mm 代入式(1)得 θ=60°,当 θ 介于 60°~90°时弯折弹齿重复除草且其与土壤的阻力增大、功耗增加,综合考虑弹齿弯折角度 θ 取 60°。除草刀盘的材料为 65Mn 弹簧钢,弹簧钢遇到较硬物质时不易变形,对其进行冷拔硬化以及镀锌处理,使其具有足够的韧性和塑性同时具有较高的防锈、防腐蚀性能。

其性能比较适合水田除草部件作业的要求。

行走轮由 6 个除草板齿和 2 个旋转圆盘固接而成，为满足在泥脚深度较大时依然能够除草作业，行走轮的最大回转直径设计为 520 mm，行走轮的宽度设计为 40 mm。为减小整机重量选择铝合金材料。

3.2　除草刀盘弯折弹齿数

为了保证除草机前进时沿机具前进方向不漏除，除草刀盘上所有弯折弹齿的除草作用长度之和应大于除草刀盘旋转一周时机器实际前进的距离，其公式为

$$Zs \geqslant v\frac{60}{n}\times 1\,000 \tag{2}$$

式中　Z——除草刀盘上弯折弹齿个数，个

s——单个弯折弹齿在旋转一周时作用于泥土的距离，mm

v——除草机前进速度，m/s

n——除草刀盘的转速，r/min

根据测定，除草机前进速度 v 为 0.3 ~ 0.6 m/s；除草部件的转速 n 为 15 ~ 55 r/min。式(2)中 s 与除草刀盘最大回转直径、除草深度有关，当除草深度最小(50 mm)且每个弯折弹齿的 s 刚好相切时，如图 6 所示。

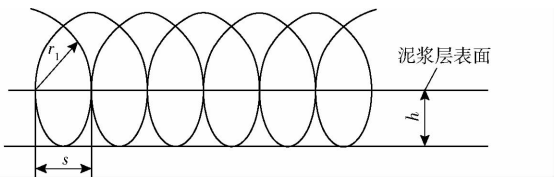


图 6　弹齿端点轨迹图

Fig. 6　Trajectory diagram of end point of spring tooth

s 的计算式为[20]

$$s = 2\sqrt{4r_1h - h^2} - \frac{60v}{n\pi}\arccos\left(1 - \frac{h}{2r_1}\right) \tag{3}$$

式中　r_1——除草刀盘上弯折弹齿顶点到蜗轮轴中心的距离，mm

h——除草深度，mm

将式(3)代入式(2)，得到

$$Z \geqslant \frac{60\pi v}{2\pi n\sqrt{4r_1h - h^2} - 60v\arccos\left(1 - \frac{h}{2r_1}\right)} \tag{4}$$

将 $r_1 = 110$ mm 和 $h_{\min} = 50$ mm 代入式(4)，求得 $Z \geqslant 2.81$，取整数 $Z = 3$。单个除草刀盘上设计双侧各 3 个弯折弹齿共 6 个弯折弹齿，使得每个弯折弹齿的 s 有部分重叠，满足杂草不漏除的要求。

3.3　仿形浮漂设计

为了保证单行除草机田间除草作业时达到仿形的效果，设计了一种可根据水田土壤高低起伏状态进行仿形运动的浮漂，其具体结构如图 7 所示。仿形浮漂主要由拖板、支杆、连接杆、螺旋拉伸弹簧组成。拖板由聚氟四乙烯苯板制成，此种材料质量轻、不沾泥、便于清理。拖板和支杆使用铰接连接，便于浮漂的仿形运动。

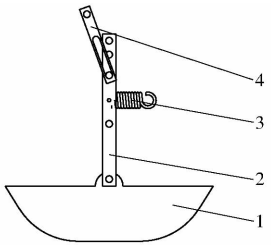


图 7　仿形浮漂结构图

Fig. 7　Structure diagram of profiling float

1. 拖板　2. 支杆　3. 螺旋拉伸弹簧　4. 连接杆

除草作业时，根据除草时间和泥脚深度的不同，通过调节支杆与机架铰接位置调整除草深度。

3.4　减速器的选择

发动机选择最大功率为 2.5 kW 的二冲程汽油机，其最大转速为 7 500 r/min，发动机变速箱的传动比为 1∶4，农艺要求的水田除草机前进速度为 0.3 ~ 0.6 m/s，考虑到水田农业机械存在的滑转率[21－23]，选择减速比为 1∶30 的蜗轮蜗杆减速器。当发动机以额定功率工作时除草机速度为 0.35 ~ 0.55 m/s，满足水田除草机作业速度要求。

4　除草刀盘运动学与动力学分析

4.1　运动学分析

根据除草机理，获得除草刀盘弹齿端点速度图如图 8 所示，根据点的合成运动，得出速度关系式为

$$\begin{cases} v_x = v + \dfrac{1}{2}\omega d_2\cos(\omega t) \\ v_y = \dfrac{1}{2}\omega d_2\sin(\omega t) \end{cases} \tag{5}$$

式中　ω——除草刀盘旋转角速度，rad/s

t——除草刀盘旋转时间，s

v_x——除草刀盘弹齿端点在 x 轴上的合速度，m/s

v_y——除草刀盘弹齿端点在 y 轴上的合速度，m/s

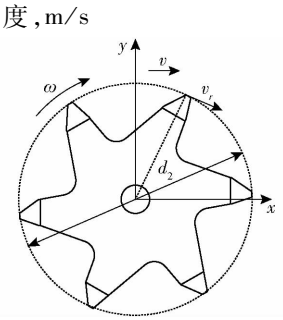


图 8　除草齿端点速度分析

Fig. 8　Schematic diagram of speed analysis for weeding tooth tip

d_2——除草刀盘直径,m

根据除草刀盘运动方向的设定,除草刀盘弹齿端点的运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = \left(\frac{1}{2}\omega d_2\cos(\omega t) + v\right)t \\ y = \frac{1}{2}\omega t d_2\sin(\omega t) \end{cases} \tag{6}$$

将除草刀盘三维模型图导入到 ADAMS 动力学仿真软件中,根据式(6)设定其前进速度 v 为 0.3 ~ 0.6 m/s,设定其旋转角速度 ω 为 π ~ 2π rad/s,得到其轨迹如图 9 所示。

图 9 除草刀盘 ADAMS 动力学软件仿真轨迹

Fig. 9 Simulation path of weeding diagram of weeding device by ADAMS

4.2 除草机动力学分析

为了选取合适的发动机以及设计合理减速比的减速器,需要对除草机驱动力矩进行计算,分别对除草部件、机架与仿形浮漂整体进行受力分析。除草机接触土壤的部分为除草部件与仿形浮漂。

4.2.1 除草部件受力分析

除草部件(包括除草刀盘和行走轮)作为除草机的关键部件之一,其主要受到土壤的法向力和摩擦力,如图 10 所示。以除草刀盘中心为坐标原点 O,x 轴正方向与除草机前进方向相反,除草部件(包括除草刀盘和行走轮)的集中受力点与原点 O 横向距离为 s_1、纵向距离为 h_1;在不同的工况下,其合力受力点位置不一样。由于行走轮和除草刀盘对土壤的垂直挤压主要发生在第三象限,可得土壤对除草系统的合力受力点在第三象限。

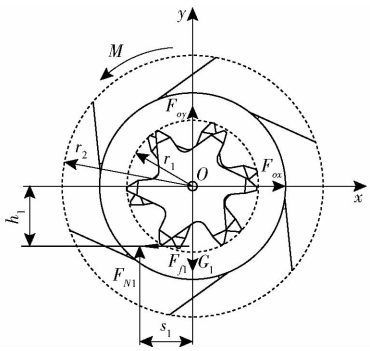


图 10 除草部件受力分析

Fig. 10 Stress analysis of weeding components

当除草机匀速除草作业时,其力的平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{ox} - F_{f1} = 0 \\ \sum F_y = G_1 - F_{oy} - F_{N1} = 0 \\ \sum M_o(F) = M - F_{N1}s_1 - F_{f1}h_1 = 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中 F_{ox}——蜗轮轴对除草部件的合力在 x 轴上的分力,N

F_{f1}——土壤对除草部件的合力在 x 轴上的分力,N

G_1——除草部件的重力,N

F_{oy}——蜗轮轴对除草部件的合力在 y 轴上的分力,N

F_{N1}——土壤对除草部件的合力在 y 轴上的分力,N

M——除草机驱动力矩,N·m

4.2.2 机架与仿形浮漂整体受力分析

机架与仿形浮漂整体受力分析如图 11 所示。机架与仿形浮漂整体重心与原点 O 的横向距离为 s_2、纵向距离为 h_3;仿形浮漂的受力集中点与原点 O 横向距离为 s_3、纵向距离为 h_2。当机架与仿形浮漂整体匀速运动时,力的平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{f2} - F'_{ox} = 0 \\ \sum F_y = F_{N2} - G_2 - G_3 - F'_{oy} = 0 \\ \sum M_o(F) = F_{f2}h_2 + F_{N2}s_3 - (G_2 + G_3)s_2 - M' = 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中 G_2——仿形浮漂重力,N

G_3——机架重力,N

F_{f2}——土壤对仿形浮漂的合力在 x 轴上的分力,N

F_{N2}——土壤对仿形浮漂的合力在 y 轴上的分力,N

F'_{ox}——除草部件对蜗轮轴的合力在 x 轴上的分力,N

F'_{oy}——除草部件对蜗轮轴的合力在 y 轴上的分力,N

M'——除草机驱动力矩的反力矩,N·m

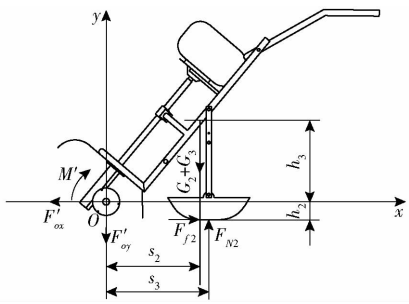


图11 机架和仿形浮漂整体受力分析

Fig. 11 Force analysis of rack and profiling floater

式(7)、(8)中,$F_{ox} = F'_{ox}$,$F_{oy} = F'_{oy}$,$M = M'$,$F_{f1} = f_{N1}F_{N1}$,$F_{f2} = \mu F_{N2}$,f_{N1}为滚动摩擦因数,μ 为滑动摩擦因数。由式(7)和式(8)可得 $F_{f1} = F_{f2}$。

假设 $f_{N1} = \mu = 1$,则 $F_{f1} = F_{N1}$,$F_{f2} = F_{N2}$。则有

$$F_{f1} = F_{f2} = F_{N1} = F_{N2} \tag{9}$$

由式(8)和式(9)可得

$$M = F_{N1}s_1 + F_{f1}h_1 = F_{N1}(s_1 + h_1) \tag{10}$$

$$F_{oy} = G_1 - F_{N1} \tag{11}$$

$$F'_{oy} = F_{N2} - G_2 - G_3 \tag{12}$$

联立式(9)～(12)可得

$$F_{N1} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{2} \tag{13}$$

联立式(10)、(13)可得

$$M = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{2}(s_1 + h_1) \tag{14}$$

因 s_1、h_1 都位于第三象限，由图 10 可得

$$\max(s_1 + h_1) = \frac{\sqrt{2}}{2}d_2 \tag{15}$$

将式(15)代入式(14)得

$$M_{\max} = \frac{\sqrt{2}(G_1 + G_2 + G_3)d_2}{4} \tag{16}$$

其中 $G_1 + G_2 + G_3$ 为整机重力，为 294 N，代入 d_2 = 0.52 m 得到 $M_{\max}$ = 54 N·m。

当发动机以额定功率工作时，蜗轮蜗杆减速器输出扭矩大于 54 N·m，因此减速器满足设计要求。

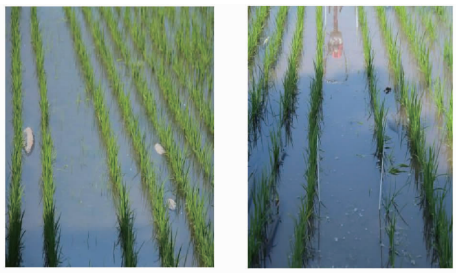
5　田间试验

5.1　试验地点及条件

为了测试铺膜插秧的单行除草机的工作性能，通过田间验证试验，确保作业效果达到设计的技术要求。2017 年 6 月 16 日在黑龙江省五常市拉林镇有机水稻生产基地进行田间试验。水稻品种为龙阳 16，铺膜插秧后 21 d，插秧后没有进行任何形式的除草作业。秧苗行距为 500 mm，地膜向覆膜插秧机作业后相邻的 2 个作业单元行间两侧分别延伸 100 mm，平均泥脚深度为 240 mm，秧苗高度为 250～300 mm，根系平均深度为 80～100 mm，杂草(稗草为主)高度为 150～200 mm，行间杂草的平均密度为 82 棵/m^2，操作人员操作熟练，机器状况良好，如图 12 所示。除草前后的对比如图 13 所示。

图 12　除草机田间作业

Fig. 12　Weeding machine in field



(a) 除草前　　(b) 除草后

图 13　除草前后效果对比

Fig. 13　Effects comparison before and after weeding

5.2　试验因素及指标

除草机的前进速度和除草深度是影响除草率的重要因素。选取除草机的前进速度和除草深度为试验因素，参考文献[24－26]，选取除草率作为除草机工作性能的考核指标。因针对铺膜插秧种植方式的除草并不接触到秧苗，所以未选取伤苗率作为工作性能考核指标。除草率的计算公式为

$$y = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \times 100\% \tag{17}$$

式中　y——除草率，%

X_1——测试区域内除草前杂草总数，棵

X_2——测试区域内除草后杂草总数，棵

5.3　试验设计与结果分析

以除草机前进速度为因素，除草率为指标进行单因素试验。其结果如表 2 所示。

表 2　前进速度单因素试验结果

Tab. 2　Results of single factor test on advance speed

前进速度/(m·s^{-1})	除草率/%
0.30	77.21
0.35	77.86
0.40	78.45
0.45	78.52
0.50	78.20
0.55	77.35
0.60	76.26

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析，得到机器前进速度与除草率的关系曲线如图 14 所示。

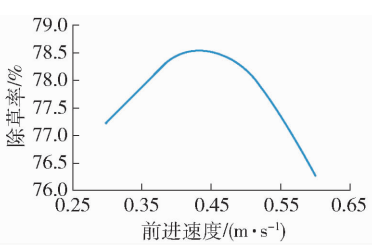


图 14　前进速度与除草率关系曲线

Fig. 14　Relationship curve between advance speed and weeding rate

得到相应的回归方程

$$y = 52.03 + 103.51x_1 - 118.93x_1^2 \quad (18)$$

以除草深度为试验影响因素,除草率为影响指标进行单因素试验,根据多次的田间试验可得,除草深度的经验取值为 50 ~ 110 mm,其结果如表 3 所示。

表 3 除草深度单因素试验结果

Tab. 3 Results of single factor test on weeding depth

除草深度/mm	除草率/%
50	76.89
60	77.34
70	77.86
80	78.45
90	78.84
100	79.26
110	79.82

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析,得到除草深度与除草率的关系曲线如图 15 所示。

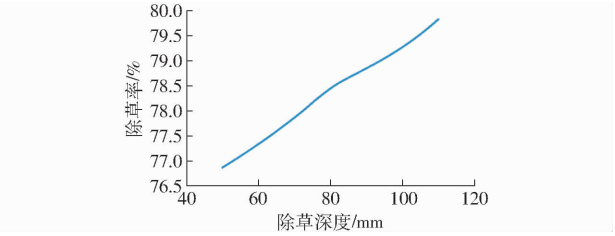


图 15 除草深度与除草率关系曲线

Fig. 15 Relationship curve between weeding depth and weeding rate

得到相应的回归方程

$$y = 74.43 + 0.048\,9x_2 \quad (19)$$

对上述回归方程与曲线图进行分析可知,除草机前进速度与除草深度对除草率影响显著。由图 14 可知,除草率随机器前进速度的增加先增大后减小,此结果是由于机器前进速度由 0.36 m/s 增大至 0.44 m/s 时,除草部件对土壤的扰动由小变大,除草率逐渐增大并且达到了最大值。当机器前进速度由 0.45 m/s 增大至 0.56 m/s 时,由于机器出现打滑入土不充分的现象,除草率出现下降趋势。由图 15 可知,除草率随着除草深度的增加而增大,随着除草深度的增加除草部件与土壤作用面积增大,对杂草的作用能力变强,致使除草率上升。但随着除草深度的增加,发动机的功耗增加,由田间试验可知,当除草深度大于 100 mm 时,发动机出现发热严重,并伴随着少许黑烟现象。综合考虑,除草机正常作业时最佳除草深度范围为 50 ~ 100 mm。经测试,单行除草机的平均除草率为 78.02% 。

6 结论

(1)设计了一种 3SCJ - 1 型水田单行除草机,该机由二冲程汽油发动机提供动力,二级传动方式增加扭矩,采用回转旋切式除草刀盘和行走轮组成的复合除草部件进行高效除草。该机的特点是单行作业,轻便,除草效率高。

(2)除草部件为带有弯折弹齿的新型除草刀盘和行走轮的复合结构,对除草刀盘的结构进行分析,得到弹齿的最佳排列个数,并对除草刀盘的运动轨迹进行了仿真分析,同时对整机进行了力学分析,得到除草机最大理论驱动扭矩为 54 N·m。

(3)对除草机进行了单因素田间试验,得到机器前进速度与除草率之间呈现抛物线的函数变化规律;除草深度与除草率之间呈现线性的函数变化规律。经田间性能试验获得机具平均除草率为 78.02% ,3SCJ - 1 型单行除草机作业质量良好,满足铺膜插秧种植方式的除草要求。

参 考 文 献

1 陈凤林,张维金,籍质勤. 绿色有机水稻机械覆膜插秧技术[J]. 现代农业,2015(8):50 - 51.
CHEN Fenglin, ZHANG Weijin, JI Zhiqin. Green organic rice coated mechanical transplanting technology[J]. Modern Agriculture, 2015(8):50 - 51. (in Chinese)

2 于磊,牟雪雷,韩休海,等. 水稻覆膜高速插秧机的设计研究[J]. 农业科技与装备,2015(6):34 - 35,38.
YU Lei, MOU Xuelei, HAN Xiuhai, et al. Research on the design of rice high-speed film mulching and transplanting machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2015(6):34 - 35,38. (in Chinese)

3 牟雪雷,于磊,韩休海,等. 有机水稻覆膜插秧技术研究[J]. 农业科技与装备,2015(6):67 - 68.
MOU Xuelei, YU Lei, HAN Xiuhai, et al. Study on the technique of organic rice mulching and translating[J]. Agriculture Science & Technology and Equipment, 2015(6):67 - 68. (in Chinese)

4 刘延,刘波,王险峰,等. 中国化学除草问题与对策[J]. 农药,2005,44(7):289 - 293.
LIU Yan, LIU Bo, WANG Xianfeng, et al. Problems and solutions for chemical weed control in China[J]. Agrochemicals, 2005, 44(7): 289 - 293. (in Chinese)

5 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)

6 臼井智彦,伊藤勝浩,大里達朗. 水稻栽培における固定式タイン型除草機の除草効果[J]. 東北雑草研究会,2009(9):38 - 41.

7 みのる産業株式会社. 除草機:日本,4038538[P]. 2007 - 11 - 16.

8　和同産業株式会社. 水田の草取り機：日本，4057492[P]. 2007－12－21.
9　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.
10　独立行政法人農業·食品産業技術総合研究機構，株式会社クボタ，井関農機株式会社. 水田除草機：日本，3965430[P]. 2007－06－08.
11　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)
12　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)
13　李钟哲. 一种水田动力除草机：01220661. X[P]. 2001－03－27.
14　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)：58－63. 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.
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)：58－63. (in Chinese)
15　魏从梅，王金武，张影微，等. 水田除草关键部件扭矩测试试验研究[J]. 东北农业大学学报，2012，43(5)：87－91.
WEI Congmei，WANG Jinwu，ZHANG Yingwei，et al. Study on torque measurement of key component[J]. Journal of Northeast Agricultural University，2012，43(5)：87－91. (in Chinese)
16　牛春亮，王金武. 水稻苗间除草装置工作机理分析[J]. 农业工程学报，2010，26(1)：51－54.
NIU Chunliang，WANG Jinwu. Analysis on working mechanism of paddy weeding device[J]. Transactions of the CSAE，2010，26(1)：51－54. (in Chinese)
17　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 cultivators working in paddy rice seeding lines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2010，41(6)：81－86. (in Chinese)
18　谭宏杰，孙明哲，李春胜，等. 水田行间除草机的研究[J]. 农业与技术，2016，36(22)：55－56.
19　刘永军，王金武，陶桂香，等. 栅条式水田行间除草装置运动学分析与试验研究[J]. 农机化研究，2015，37(5)：155－158.
LIU Yongjun，WANG Jinwu，TAO Guixiang，et al. Kinematics analysis and experimental study on grid Inter-row weed control device for paddy field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2015，37(5)：155－158. (in Chinese)
20　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(4)：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(4)：31－35. (in Chinese)
21　孙中兴，唐力伟，汪伟，等. 考虑土壤滑转流动的柔性履带应力分布研究[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(1)：317－324. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20170142&journal_id = jcsam. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01. 042.
SUN Zhongxing，TANG Liwei，WANG Wei，et al. Flexible track stress distribution considering slip subsidence[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(1)：317－324. (in Chinese)
22　郭俊，姬长英，ARSLAN Chaudhry，等. 稻麦秸秆旋耕作业中受力与位移分析[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(10)：11－18. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20161002&journal_id = jcsam. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 10. 002.
GUO Jun，JI Changying，ARSLAN Chaudhry，et al. Stress and displacement analyses of rice and wheat straws in rotary tillage process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(10)：11－18. (in Chinese)
23　丁启朔，葛双洋，任骏. 水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(1)：47－56，63. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20170107&journal_id = jcsam. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01. 007.
DING Qishuo，GE Shuangyang，REN Jun. Characteristics of subsoiler traction and soil disturbance in paddy soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(1)：47－56，63. (in Chinese)
24　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. 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.
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. (in Chinese)
25　王金武，多天宇，唐汉，等. 水田株间立式除草装置除草机理与试验研究[J]. 东北农业大学学报，2016，47(4)：86－94.
WANG Jinwu，DUO Tianyu，TANG Han，et al. Weed mechanism and mechanics experiment of vertical weed control device between seedlings in paddy field[J]. Journal of Northeast Agricultural University，2016，47(4)：86－94. (in Chinese)
26　杨松梅，王金武，刘永军，等. 水田株间立式除草装置的设计[J]. 农机化研究，2014，36(12)：154－157.
YANG Songmei，WANG Jinwu，LIU Yongjun，et al. Design and simulation analysis of vertical weed control device between seedlings in paddy field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2014，36(12)：154－157. (in Chinese)