

深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验

林 静¹ 张桐嘉¹ 陈 彬¹ 韩 巍² 吕秋立¹ 王佳琦¹

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘要: 针对辽宁省西部褐土区常年降水量低,蒸发量较大,土壤干旱严重,严重影响作物产量问题,设计了1MXQ-4型灭茬旋耕起垄联合作业机,主要由深松装置、灭茬旋耕装置、起垄装置和镇压装置等组成。机具可一次完成深松、灭茬、旋耕、培垄和镇压等多项联合作业,实现垄沟垄台互换功能。通过对其关键部件灭茬旋耕装置的动力学分析确定了灭茬装置回转半径 R 为300 mm,入土深度 H 为8 cm,最小转速 n 为210 r/min。按犁体曲面的几何元线法设计原理,元线角 θ 按抛物线规律变化,绘制起垄铲工作曲面,确定起垄装置结构参数。通过土槽模拟土粒运动轨迹的木块试验,得出曲面楔子型培土器工作性能优于平面楔子型培土器,实现了垄台垄沟互换功能。通过三因素五水平试验,得出各因素对试验指标起垄最大高度影响主次顺序为机具前进速度、工作深度、秸秆覆盖量;各因素对工作阻力影响的主次顺序为秸秆覆盖量、工作深度、机具前进速度。利用Design-Expert软件对机具工作参数求解和实际工作验证得到最佳作业参数:机具前进速度为6 km/h,工作深度为22.2 cm,起垄最大高度为24.05 cm,工作阻力为12.08 kN。满足了辽宁省西部褐土区所需的垄台垄沟互换耕作的土壤合理耕层构建技术指标要求。

关键词: 灭茬深松起垄机; 样板曲线; 元线角; 正交试验

中图分类号: S224.29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0028-12

Design and Test of Subsoiling Rotary Rilling and Rilling Combined Operating Machine

LIN Jing¹ ZHANG Tongjia¹ CHEN Bin¹ HAN Wei² LÜ Qiuli¹ WANG Jiaqi¹

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In view of the low annual precipitation of cinnamon soil in the west of Liaoning Province, the large amount of evaporation, serious soil drought and serious impact on crop yield, a smashing and slashing ridge hoisting machine was designed and studied, which mainly consisted of deep loosening device, smashing and slashing device, ridge device and pressure device. The machine can complete a number of operations such as deep loosening, smashing, rotary tilling, ridge ridges, etc., which can reduce the number of grounding, improve work efficiency, and meet the operation requirements of furrow-ridge and ridge interchange in the brown soil area of Western Liaoning. The kinetic analysis of smashing device of the key components was determined as the rotating radius was 300 mm, the depth of grounding device was 8 cm, and the minimum speed n was 210 r/min. According to the geometric element method design principle of the plow surface, the element angle θ was changed according to the parabola law, the ridge shovel working surface was drawn, and the structural parameters of the ridge device were determined. The wood block experiment of simulating the movement of soil particles through the soil trough showed that the performance of the curved wedge type soil cultivator was better than that of the plane wedge type cultivator, and the ridge and furrow ditches were realized. Through the three factors and five levels test, the main factors affecting the maximum ridge height of the test indicators were the advancement speed of the machine, working depth and straw coverage; the main order of influence of each factor on the working resistance was straw coverage, working depth and the speed of machine. The

收稿日期: 2018-11-20 修回日期: 2018-12-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503116-09)、国家自然科学基金项目(51275318)和辽宁省农村经济委员会与质量技术监督局地方标准项目(2016160-27)

作者简介: 林静(1967—),女,教授,博士生导师,主要从事旱作农业机械化及智能化装备研究, E-mail: 836546539@qq.com

Design-Expert software was used to solve the working parameters of the machine, and the actual work verified the best operating parameters as follows: the machine forward speed of 6 km/h, working depth of 22.2 cm, maximum distance of cast soil of 24.05 cm, and working resistance of 12.08 kN. It satisfied the technical requirements for the construction of reasonable soil layering for the intercropping of ridges and ridges in the brown soil area of western Liaoning Province, and provided reference for the reformation and evaluation of the combined soil preparation machine.

Key words: stubble-killing and deep-loosening ridging machine; template curve; element line angle; orthogonal test

0 引言

辽宁省西部地区(辽西褐土区)常年降水量较低,蒸发量较大,土壤干旱程度严重,耕层土壤有机质含量低、结构性差;耕地土壤长期以旋耕为主,普遍存在着土壤耕层变浅、犁底层加厚、土壤板结、蓄水保墒能力降低等问题,严重制约该地区的粮食生产^[1-14]。为了改善该地区褐土耕层结构,提高土壤的蓄水保墒能力,为玉米播种创造良好的土壤环境,研究适用于该地区的联合整地机尤为重要^[15-21]。

为了解决耕层恶化问题,国内许多学者都进行了联合作业机的研究。赵大勇等^[22]为了解决联合整地机不能深松的问题,研制了 1ZML-210 深松型联合整地机,该机能够一次性完成灭茬、深松、旋耕、起垄和镇压等多项作业,田间试验表明可以使田间状况达到播种要求。孙伟等^[23]针对北方干旱半干旱地区设计了 1ZSZL-3000 型深松灭茬整地联合作业机,可以一次完成深松、灭茬、镇压等多项作业,灭茬装置和深松装置可以根据实际情况进行调节,有利于保护性耕作的推广和利用。潘世强等^[24]针对吉林省半干旱地区的环境特点设计了 SZL-2 型深松施肥起垄联合作业机,对机具进行了田间试验,试验结果表明该机作业效果较好,可以完成碎茬、深松、施肥、起垄等作业,为以后进行深入研究打下了坚实的基础。毛俐^[25]在原有灭茬旋耕机基础上增加了深松功能,设计了一种新型的灭茬深松旋耕起垄机,能够一次性完成灭茬、深松、旋耕和起垄等作业。文献[22-25]分别根据其地区的需求研究了灭茬、深松、起垄等联合整地机,对整地机械的发展起到了应有的作用。传统耕整机械作业时,拖拉机需要分别挂接铧式犁、灭茬机、深松铲、旋耕机、耙、起垄机等不同机具,多次进地才能完成播种前的整地作业。拖拉机多次进地,严重破坏土壤的团粒结构,犁底层加厚,土壤板结,长期以往会导致土壤退化和沙化,农作物产量逐年降低,且机具作业效率低,不利于抢农时。联合整地作业机是整地机械发展的重要方向,机具只需一次进地作业即可达到种子待播要求。辽宁省西部地区原垄台经过冬天的风

吹日晒,再加上春季干旱,含水量低于垄沟,为了春季播种育苗,需将种子播在原垄沟中。针对辽西地区的墒情、耕种模式以及当地的气候特点,结合合理耕层构建褐土区技术指标要求,本文设计一种适合辽宁省西部褐土区联合整地机,一次作业可同时完成灭茬、旋耕、深松、起垄、镇压等多项功能,实现垄沟与垄台互换功能,为辽宁省西部褐土区耕层合理构建提供配套机具^[26-31]。

1 整机总体结构与工作机理

1.1 整机总体结构

1MXQ-4 型灭茬旋耕起垄联合作业机总体结构如图 1 所示。机具从前至后由机架、上下悬挂装置、深松装置、灭茬旋耕装置、起垄装置、镇压装置、变速箱及传动装置等组成。机架由前架和后架组成,深松装置通过 U 型螺栓固定在前架前端,左右可调;将左右对称的两上挡板焊接在前架两端上,下挡板通过螺栓固定于上挡板上;将灭茬旋耕装置通过左右对称的下挡板中间的定位圆孔固定在前架下;悬挂装置和变速箱固定在前架上;传动装置连接变速箱与灭茬旋耕装置;起垄装置与镇压装置依次通过 U 型螺栓固定在后架上。深松装置由 U 型螺栓、固定夹、深松铲柄及深松铲尖等构成。灭茬旋耕装置由长短套管、灭茬装置、旋耕装置及灭茬旋耕轴

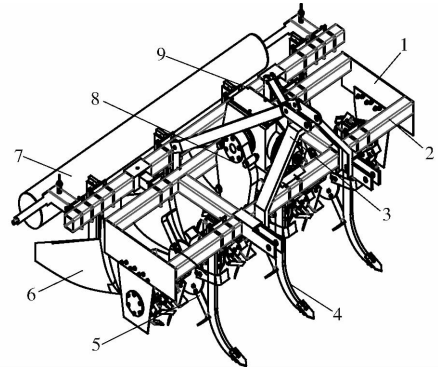


图 1 灭茬旋耕起垄联合作业机结构简图

Fig.1 Schematic of structure of stubble rotary tillage and ridge

1. 侧挡板 2. 机架 3. 悬挂机构 4. 深松装置 5. 灭茬旋耕装置 6. 起垄装置 7. 镇压装置 8. 链传动装置 9. 中央变速箱

构成,起垄装置由 U 型螺栓、固定夹、培土面、焊板、起垄铲柄及起垄铲尖组成。镇压装置由镇压滚筒、镇压调节装置、U 型螺栓和镇压座等组成。

1.2 工作机理

1MXQ-4 型灭茬旋耕起垄联合作业机的灭茬旋耕装置通过变速箱与传动装置的配合调节转速,提高了机具的适用性,主要性能参数如表 1 所示。机具通过悬挂装置与拖拉机连接,拖拉机的动力输出轴将动力传至中央变速箱,中央变速箱带动灭茬旋耕装置完成灭茬旋耕作业。机具工作时,在拖拉机前进速度带动下深松装置在垄沟进行深松作业,中央变速箱带动灭茬旋耕装置转动,灭茬旋耕轴上灭茬部分在垄台灭茬,将地表覆盖的秸秆粉碎和土壤进行混拌填埋。旋耕部分在垄沟进行旋耕作业,起垄装置作业于垄台,通过起垄曲面的设计,在原垄形的基础上实现垄沟、垄台互换,最后镇压装置实现镇压作业,改善土壤结构,构建合理耕层结构,为玉米播种提供良好的土壤环境。

表 1 1MXQ-4 型灭茬旋耕起垄联合作业机主要性能参数
Tab.1 Main performance parameters of 1MXQ-4 type stubble rotary tillage and ridge cooperating machine

参数	数值
配套动力/kW	≥49
外形尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	2 400×1 775×1 275
行数	4
适应行距/cm	45~60
工作幅宽/mm	135~180
深松深度/cm	20~30
灭茬深度/cm	8~10
旋耕深度/cm	10~15
起垄后垄高/cm	20~30
旋耕灭茬轴转速/(r·min ⁻¹)	210、233、252、280
整机质量/kg	540

2 关键部件设计

2.1 深松装置

为了提高土壤的通透性,降低旋耕作业时旋耕部分所受阻力,减少机具能耗,在灭茬旋耕装置的旋耕部分前安装深松装置,对垄沟底部进行先深松后旋耕作业。提高机具适用性和使用寿命。深松装置主要由固定夹、深松铲柄和铲尖构成,如图 2 所示。深松装置通过 U 型螺栓和固定夹挂接于机架上,深松铲柄通过六角螺栓和六角螺母固定于固定夹上,铲尖通过六角螺栓和六角螺母固定于深松铲柄上,深松铲的入土深度可通过深松铲柄上等距定位孔进行调节,深松深度调节范围为 25~30 cm,深松铲入

土角设计为 18°。其中固定夹由厚度 10 mm 的钢板焊合而成,该结构可以有效防止相连螺栓发生断裂。深松铲柄为厚度 20 mm 的铸钢,经过热处理后强度合理。铲尖材料采用 65Mn,铲尖宽度为 50 mm,铲尖锐刀楔角为 10°,由螺栓固定,可更换,损耗时拆卸方便。通过对深松铲参数的优化设计,可提高深松铲的深松效果。

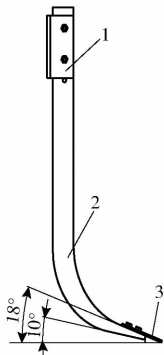


图 2 深松装置结构简图
Fig.2 Schematic of structure of loosening device
1. 固定夹 2. 深松铲柄 3. 铲尖

2.2 灭茬旋耕装置

2.2.1 灭茬旋耕装置结构设计

灭茬旋耕装置主要由灭茬装置、旋耕装置、灭茬旋耕轴、长套管、短套管、链轮、灭茬旋耕轴承套筒和灭茬旋耕轴承外端盖组成,如图 3 所示。灭茬旋耕装置是针对辽西地区耕作情况设计的,灭茬装置在垄台上工作,将根茬和土壤进行混埋作业,旋耕装置在垄沟中工作,对土壤进行旋耕作业,该装置可在一次作业中实现灭茬和旋耕两项作业。灭茬装置和旋耕装置可以通过实际田间垄距情况调节相邻两组灭茬装置和旋耕装置的中心距,使中心距等于垄距,该机具的适用垄距为 45~60 cm。每组灭茬装置由焊接在长套管上的两组相对的灭茬刀盘组成,两组灭茬刀盘间距为 140 mm,每组灭茬刀盘由通过螺栓固定于灭茬盘的 6 把方向相同的灭茬刀组成。整机包括 4 组灭茬装置,工作于垄台上。每组旋耕装置由焊接在短套管上的旋耕刀盘组成,旋耕刀盘由通过螺栓固定于旋耕盘的 3 把向左的旋耕刀和 3 把向右的旋耕刀组成,旋耕刀采用多区段螺旋线对称排列,整机包括 3 组旋耕装置,工作于垄沟上。灭茬刀盘和旋耕刀盘通过螺栓固定于灭茬旋耕轴的通孔上。灭茬旋耕轴两端与轴承、轴承套筒和轴承外端盖配合,并固定于机架两侧挡板上,通过链传动带动工作。灭茬旋耕轴上设置多个等距定位孔,间距为 5 cm,其中灭茬旋耕轴材料采用直径为 78 mm 的 45 号钢,套管的外径为 83 mm,刀盘厚度为 10 mm,灭茬刀型号为 M I 245 型,旋耕刀型号为 P II 225 型,

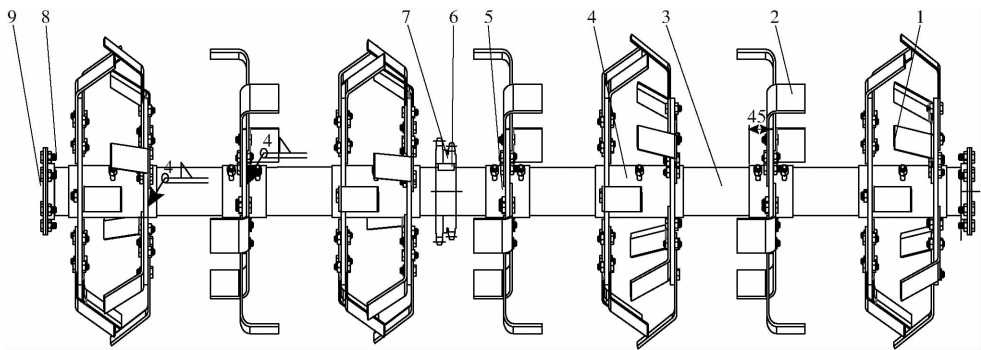


图 3 灭茬旋耕装置结构简图

Fig. 3 Schematic of structure of stubble rotary tillage

1. 灭茬装置 2. 旋耕装置 3. 灭茬旋耕轴 4. 长套管 5. 短套管 6. 小链轮 7. 大链轮 8. 灭茬旋耕轴承套筒 9. 灭茬旋耕轴承外端盖

灭茬入土深度为 8 ~ 10 cm, 旋耕碎土深度为 10 ~ 15 cm。

2.2.2 灭茬装置运动分析

灭茬装置在工作时正旋运动, 旋转方向与配套动力前进方向一致。灭茬刀在运动时作直线运动和匀速圆周运动, 若以时间 $t=0$ 时的刀轴轴心为坐标原点, x 正向为动力前进方向, 垂直向下为 y 轴正向, 以 xOy 为投影面, 设灭茬刀刀上点 N 坐标为 $N(x, y)$, 其运动方程可表示为

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos(\omega t) \\ y = R \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 t ——时间, s

R ——灭茬刀回转半径, mm

ω ——灭茬装置刀辊角速度, rad/s

v_m ——配套动力前进速度, mm/s

则灭茬刀刀上点 N 的运动轨迹如图 4 所示。

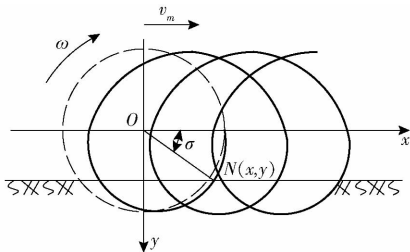


图 4 灭茬刀刀上点的运动轨迹

Fig. 4 Stubble trajectory points on blade

公式(1)对 t 求导可得

$$\begin{cases} v_x = v_m - R\omega \sin(\omega t) \\ v_y = R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

则灭茬刀刀上点的切削速度

$$v = \sqrt{v_m^2 + (R\omega)^2 - 2v_m R\omega \sin(\omega t)} \quad (3)$$

由公式(3)可知, 灭茬刀刀上点的速度变化和三角函数曲线相似, 灭茬刀工作时, 当 $0 < \omega t < \pi/2$ 时, 灭茬刀上点的速度 v 随 ωt 的增大而减小; 当 $\omega t = \pi/2$ 时, 灭茬刀上点的速度 v 达到最小值; 当

$\pi/2 < \omega t < \pi$ 时, 灭茬刀上点的速度 v 随 ωt 的增大而增大。配套动力前进速度 v_m 的绝对值不小于灭茬刀灭茬速度 v_0 ($|v_m| \geq |v_0|$), 在灭茬刀工作时, 设灭茬深度为 H_1 , 灭茬刀前端接触地面时的时间为 t , 灭茬刀入土角如图 5 所示。

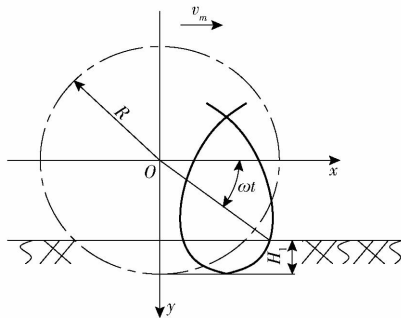


图 5 灭茬刀入土角示意图

Fig. 5 Sketch of penetrating angle of stubble blade

灭茬刀入土角为

$$\sigma = \omega t = \arcsin \frac{R - H_1}{R} \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(2)中, 可得

$$v_x = v_m - \sigma(R - H_1) \quad (5)$$

为了计算简便, 将 v_x 的绝对值代入可得

$$\sigma \geq \frac{v_m - v_x}{R - H_1} \quad (6)$$

即

$$n \geq 30 \frac{v_m - v_x}{\pi(R - H_1)} \quad (7)$$

式中 n ——转速, r/min

由公式(7)可得出灭茬刀辊的主要运动参数为灭茬深度 H_1 、灭茬速度 v_0 (v_x)、机具前进速度 v_m 和刀辊的转速 n 。同时, 在满足灭茬作业要求的情况下, 灭茬刀轴转速 n 与半径 R 成反比。设计时选择的刀辊应尽量转速小、直径大。灭茬装置所需灭茬刀最小灭茬速度 v_0 为 5 m/s, 灭茬装置回转半径 R 为 300 mm, 灭茬入土深度 H_1 为 8 cm, 根据公式(7)计算得灭茬装置转速 n 最小为 210 r/min。

2.3 起垄装置

2.3.1 起垄装置结构设计

起垄装置用于将原垄台的土分向垄沟,将土壤从垄台中间切开,使土壤沿起垄装置分土板的两侧向后倾斜运动上升,达到预定沟边时,推向垄中心,使土壤按自然休止角形成要求的垄形。起垄装置的结构如图 6 所示,主要由起垄铲尖、铲柄、培土板、焊板和固定夹构成。起垄装置通过固定夹和 U 型螺栓与机架连接,固定夹与铲柄通过螺栓固定,工作深度可通过螺栓连接铲柄和固定夹的定位孔进行调节,调节范围为 200 ~ 350 mm,培土板与铲柄、焊板焊接固定,起垄铲尖通过螺栓固定在培土板上。起垄装置工作垄距可调,工作范围为 450 ~ 600 mm。该起垄装置适用于垄间作业,工作于垄台上,工作后可按农艺要求一次性实现垄沟、垄台互换功能,实现将种子播在上一年种植的垄沟中,以利于种子的发芽保苗。

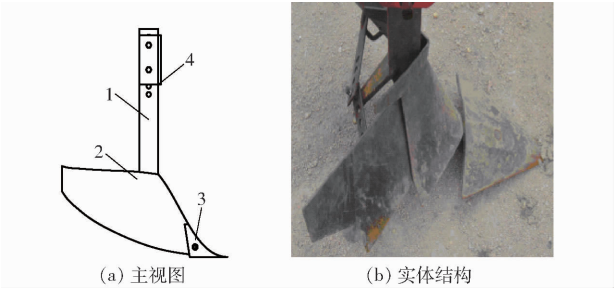


图 6 起垄装置
Fig. 6 Ridge device
1. 铲柄 2. 培土板 3. 起垄铲尖 4. 固定夹

2.3.2 起垄铲工作曲面的形成原理

起垄铲培土板的工作性能主要由导曲线参数与元线角的变化规律决定。因此,首先建立导曲线的数学模型,导曲线的形状与参数如图 7 所示。

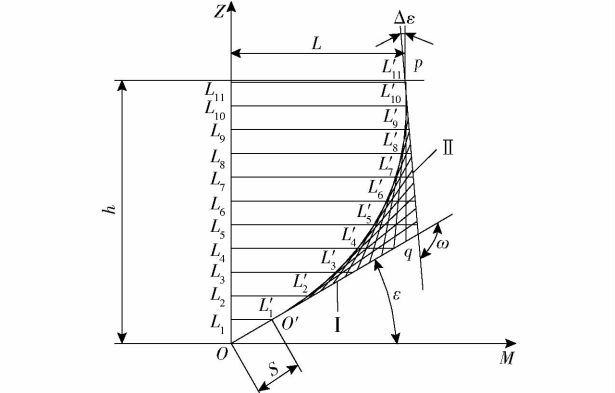


图 7 导曲线的形状与参数
Fig. 7 Curve shape and parameters

导曲线的高度 h 与耕深、耕宽的关系可表示为

$$h = \sqrt{a^2 + b^2} \pm \Delta h \tag{8}$$

式中 a ——耕深,mm

b ——耕宽,mm

Δh ——导曲线高度增量,mm

首先建立数学模型的直角坐标系,设导曲线的高度方向为 Z 轴,开度方向为 M 轴,则直线 I 的数学方程式为

$$Z = M \tan \varepsilon \tag{9}$$

式中 ε ——安装角, (°)

M ——导曲线对应 M 轴坐标值

直线 II 的方程式为

$$Z = h - (M - L) \tan (90^\circ - \Delta \varepsilon) \tag{10}$$

式中 $\Delta \varepsilon$ ——抛物线上端点切线与铅垂线夹角, (°)

L ——导曲线开度,mm

直线 I 和直线 II 交点 q 的坐标

$$\begin{cases} M_q = \frac{h - L \tan (90^\circ - \Delta \varepsilon)}{\tan (90^\circ - \Delta \varepsilon) + \tan \varepsilon} \\ Z_q = M_q \tan \varepsilon \end{cases} \tag{11}$$

将线段 Oq 和线段 pq 等分为 m 等份 (p 为导曲线最大开度的点), m 越大, 计算越精确。如图 7 所示标序, 直线 I 上第 i 点坐标为

$$\begin{cases} M_I(i) = M_{O'} + i \frac{M_q - M_{O'}}{m} \\ Z_I(i) = Z_{O'} + i \frac{Z_q - Z_{O'}}{m} \end{cases} \tag{12}$$

直线 II 上的第 i 点的坐标为

$$\begin{cases} M_{II}(i) = M_q + i \frac{M_p - M_q}{m} \\ Z_{II}(i) = Z_q + i \frac{Z_p - Z_q}{m} \end{cases} \tag{13}$$

连接直线 I 与直线 II 上第 i 点所得斜线的方程为

$$\frac{Z - Z_I(i)}{M - M_I(i)} = \frac{Z_{II}(i) - Z_I(i)}{M_{II}(i) - M_I(i)} \tag{14}$$

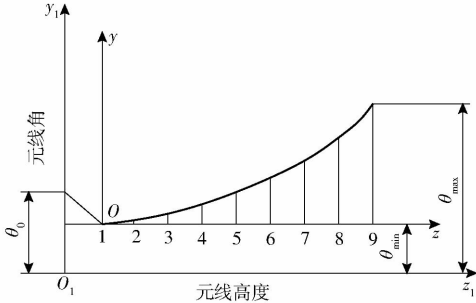


图 8 元线角变化曲线
Fig. 8 Linear angular variation curve

设各水平元线间的间隔高度为 ΔH , 曲面上第 n 根水平元线的高度即为 $Z(n)$, 则 $Z(n) = n \Delta H$ 。在坐标系 MOZ 中, 在 $Z(n)$ 高度作一水平直线与上述斜线相交于一点, 则该交点的横坐标为

$$M(n,i) = M_1(i) + (Z(n) - Z_1(i)) \frac{M_{\parallel}(i) - M_1(i)}{Z_{\parallel}(i) - Z_1(i)} \quad (15)$$

然后按式(15)逐个求出各交点坐标,求出最小值,即为导曲线上元线号为 n 的开度,坐标为

$$\begin{cases} M(n) = \min(M(n,i)) \\ Z(n) = n\Delta H \end{cases} \quad (16)$$

导曲线上点的坐标均可由公式(16)计算得出,并可绘出导曲线的图形。

按犁体曲面设计方法,由图8可知, $\theta_0 \sim \theta_{\min}$ 段,取水平坐标轴 z 代表元线高度,取垂直坐标轴 y 代表 $(\theta - \theta_{\min})$ 的值。坐标原点 $(z=0, y=0)$ 相当于元线高度为零、 θ 角为 $\theta_{\min}$ 时的数值,这一段元线角按直线关系变化,即

$$y_1 = y_0 - M_1 z \quad (17)$$

式中 y_1 —— $\theta - \theta_{\min}$ 的值, ($^{\circ}$)

y_0 —— $\theta_0 - \theta_{\min}$ 的值, ($^{\circ}$)

M_1 —— $y_0/z_{\min}$ 直线的斜率

z ——任一元线的高度, cm

$\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ 段,将坐标轴 y_1 移至 $z=z_{\min}$ 处,这一段元线角按抛物线关系变化,即

$$y = \frac{(z - z_{\min})^2}{2p} \quad (18)$$

式中 y ——按一定比例的元线角 $(\theta - \theta_{\min})$ 的变化值, ($^{\circ}$)

p ——抛物线焦点至准线的距离, cm

$z_{\min}$ ——最小元线高度坐标, cm

解得

$$y_{\max} = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{m} \quad (19)$$

式中 $y_{\max}$ ——元线角最大变化值, cm

$\theta_{\min}$ ——最小元线角, ($^{\circ}$)

$\theta_{\max}$ ——最大元线角, ($^{\circ}$)

m ——比例尺, ($^{\circ}$)/cm

根据公式(18)和公式(19)可求出

$$p = \frac{(z_{\max} - z_{\min})^2}{2y_{\max}} \quad (20)$$

式中 $z_{\max}$ ——最大元线高度坐标, cm

由此可得元线角的方程为

$$\theta = \theta_{\min} + ym \quad (21)$$

并绘制出元线角变化曲线,根据导曲线和元线角的变化规律设计起垄装置的工作曲面。

2.3.3 起垄铲的曲面设计

根据行业项目要求和实地测量辽西褐土区垄作情况数据,设计起垄垄形断面图,如图9所示。其中垄距 $T = 550$ mm,垄底宽度 $a_1 = 120$ mm,垄顶宽度

$a_0 = 180$ mm,沟底到垄顶高度 $h = 125$ mm,垄高 $h_0 = 55$ mm,开沟深度 $h_1 = 70$ mm,起垄铲工作深度为200 mm,土壤休止角 φ 为 53.1° (大于自然休止角),可实现垄沟垄台互换的起垄垄形断面。

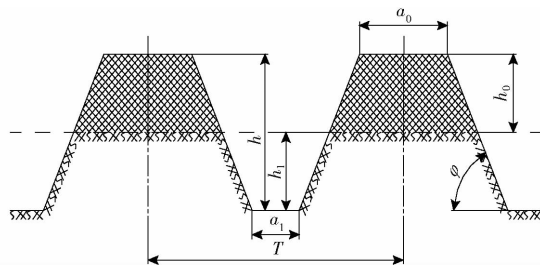


图9 垄形断面图

Fig.9 Profile of ridge

起垄铲工作曲面设计原理如图10所示。作起垄铲的对称轴线 OO' ,于轴线上绘一等于 h 的线段,并过其两端点与轴线垂直方向引直线 I-I 和直线 II-II,然后在直线 I-I 上向轴线 OO' 的两侧引等于 $a_1/2$ 的线段,该值为50 mm,分别得到点 A 和 B 。同理在直线 II-II 上引等于 $(L - a_0)/2$ 的两线段,该值为200 mm,得到点 C 和 D ,连接点 A 、 B 、 C 和 D 得到等边梯形,即起垄铲工作时所应形成的沟槽。由于起垄铲工作时土壤会产生一定程度的膨松,其上升的高度应大于原定的起垄高度 h ,所以起垄铲工作面的高度 h_2 应大于垄高 h 。当 $h_2 = h$ 或 $h > h_2$ 时,则会出现部分土壤越过起垄铲的现象,使沟底的浮土过多,培土量达不到要求。故设计起垄铲工作面的高度 h_2 时,应考虑到增高率。现有的起垄铲一般为: $h_2 = (1.1 \sim 1.2)h$, $H = 1.1h_2$ 。过点 C 和 D 分别引与 OO' 轴线平行的等于 $(0.1 \sim 0.2)h$ 的线段,得点 E 和 F ,连接点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 和 F ,即得起垄铲工作面的正投影图,其中 h 取210 mm(适当加大,防止漏土), $h_2 = 252$ mm, $H = 277$ mm。起垄铲工作面的水平投影图在 OO' 轴线上任意一点 O_1 作 γ_0 角引直线 O_1M ,该直线将限定起垄铲铲尖的刃口,角 γ_0 取值范围为 $26^{\circ} \sim 35^{\circ}$,该设计取 $\gamma_0 = 35^{\circ}$ 。在距离 O_1 点约等于 $L/3$ 处与直线 O_1M 垂直方向作直线 KK' ,此直线为垂直截面的迹。

为绘制导向曲线,起垄铲高度 h 取曲面最大高度 $H = 277$ mm,当 H 一定时, L 值越小,曲面越陡峭,碎土能力越好,但相应阻力较大; L 值越大,曲面越平坦,碎土能力越弱,土壤易通过,相应阻力较小。根据经验一般曲面设计时 h/L 为 $1.5 \sim 1.6$,该设计取1.5;一般起土角为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,该设计取 30° ,导曲线上部倾角取 $\Delta\varepsilon = 5^{\circ}$,铲刃下部直线段长度 $S = 50$ mm,两端点切线夹角 α 计算公式为

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \varepsilon - \Delta\varepsilon \quad (22)$$

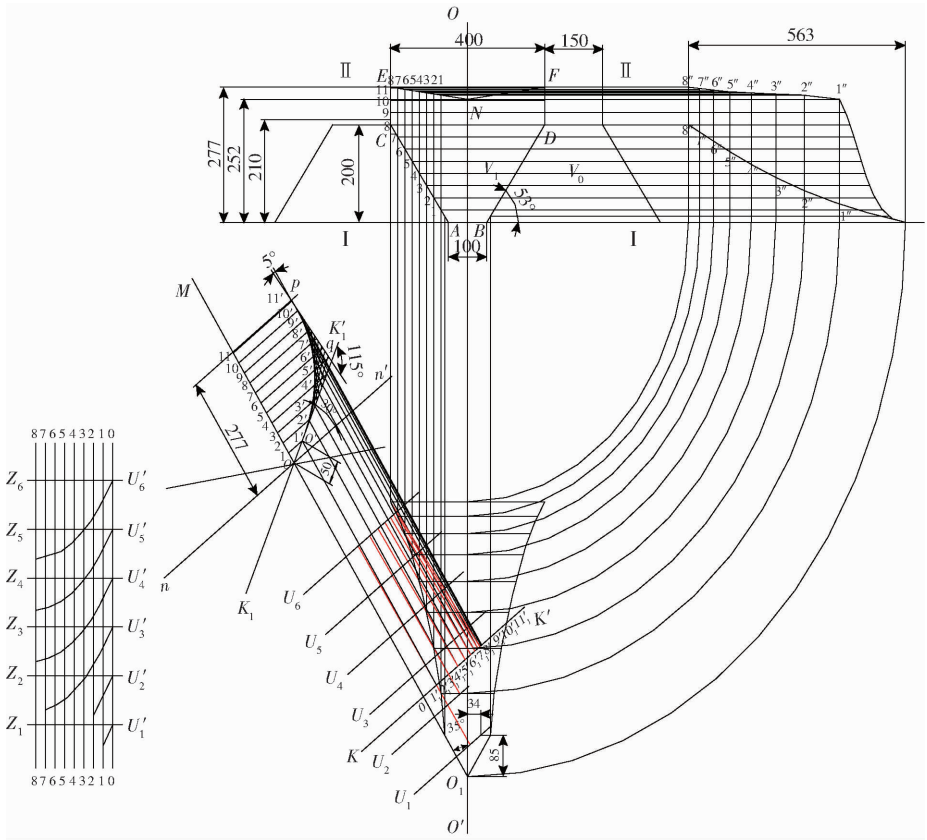


图 10 起垄铲工作曲面设计原理图

Fig. 10 Sketch of ridge shovel working surface design

由公式(22)计算得出 $\alpha = 115^\circ$ 。在曲面的水平投影图上做辅助投影面,并在辅助投影面上确定原点 O_1 ,根据 h/L 的值确定 p 点位置。按 ε 角从 O 点做下切线,按 $\Delta\varepsilon$ 从 p 点做上切线,上、下切线交于点 q 。在下切线取直线段 O_1O' 长度 $S = 50\text{ mm}$,以线段 pq 和线段 $O'q$ 为上、下切线做包络抛物线段,在下切线上从 O' 点开始以 25 mm 等距精分标注各点,连接相同的同名点,即为所求导曲线。该导曲线使起垄铲工作曲面具有以下特性:曲面的下部曲率的变化较小,有利于土堡的上升;胸部下凹,上部外扣,可以提高起垄铲工作面碎土和翻土覆盖等性能,然后在正投影图上以 25 mm 相等间距引平行线 $1-1, 2-2, 3-3, \dots$,这些即为构成线的投影。在直线 O_1M 上自点 O_1 作与正垂直投影相同间距的点 $1, 2, 3, \dots$,过这些等距的点与 O_1M 垂直引互相平行的直线并与导曲线相交于点 $1, 2, 3, \dots$,再移至水平投影的垂直断面的轨迹 KK' 上,得到点 $1, 1, 2, 1, 3, 1, \dots$ 。过这些点引 γ 角的构成线, γ 角按照一定的规律变化。与犁体曲面的设计相同,可按下列类型曲线公式求得构成线 γ 角变化的规律,即元线角变化规律为

$$y = \frac{px^2}{x^2 + q} \tag{23}$$

$$\gamma = \gamma_0 + \beta y \tag{24}$$

式中 γ ——高度 y 上构成线角

x ——确定角 γ 的不同高度(即横坐标值), cm
 y ——对应的纵坐标, cm
 β ——角 γ 的坐标比例 p, q ——常数
 γ_0 ——角 γ 的初值,取 35°
根据公式(24)和公式(23)得出

$$y = \frac{px^2}{x^2 + q} \tag{25}$$

与铧式起垄铲工作面相似,可取 p 为 6.2 cm , q 为 100 。角 γ 的比例为

$$\theta = \Delta\gamma/\gamma_{\max} \tag{26}$$

其中

$$\Delta\gamma = \gamma_{\max} - \gamma_0$$

式中 $\Delta\gamma$ ——角 γ 的最大增量,取 $2^\circ \sim 7^\circ$

根据上述公式可求出元线角 γ 的变化规律,如表 2 所示。

表 2 元线角的变化规律

Tab. 2 Variation law of element line angle ($^\circ$)

元线角	数值	元线角	数值
γ_0	20.0	γ_7	35.5
γ_1	27.0	γ_8	35.8
γ_2	32.0	γ_9	36.3
γ_3	33.0	γ_{10}	36.3
γ_4	34.0	γ_{11}	36.5
γ_5	34.5	γ_{12}	36.6
γ_6	35.0	γ_{13}	37.0

将构成线画在起垄铲工作面的水平投影图上后,将在正视投影图外形上的点 1、2、3…绘于此投影图上,并将所有已标出的点向起垄铲工作面的水平投影图上作垂线。将这些垂线与相应的构成线的交点用曲线连接起来,即可得水平投影图上起垄铲工作面的外形曲线。

用样板检验起垄铲工作面制造的准确性。样板曲线的做法如下:在水平投影图上作与刃口延长线 O_1M 垂直的平行线 $U_1, U_2, U_3, \dots$ 。然后,在辅助投影图上作平行线 $0-0, 1-1, 2-2, \dots$, 平行线间的距离与正投影导向位置的间距相等。对直线 $0-0$ 作垂线 $U'_1Z_1, U'_2Z_2, U'_3Z_3, \dots$, 并使其间距相等。以断面 U'_3 为例,将线段 $U_3E_1, U_3E_2, U_3E_3 \dots$ 移于辅助投影图上,并将其置于 U'_3Z_3 的相应构成线上。得点 $U'_3, E'_1, E'_2, \dots$, 以平滑的曲线连接,即为该断面的样板曲线。

3 起垄装置性能试验

3.1 土槽室内试验

3.1.1 试验条件与试验方法

起垄装置是机具的关键部件,为了验证起垄装置在辽西褐土区垄作环境下的工作性能和适应性,性能试验于 2017 年 9 月 20—26 日在沈阳农业大学农机实验室进行。本次土槽试验目的是为了测试曲面型起垄装置和平面楔子型起垄装置工作时土粒沿培土铲的分土板运动轨迹,用以衡量起垄装置的工作性能技术指标。试验前准备可以模拟土粒的材料,要求材料质量轻、体积小且在土壤里辨识度要高。为了提高本次试验的精度和模拟不同地区土壤土粒的性质,选用体积为 1 cm^3 的小木块为试验材料。并且按照排列顺序编上编号,如图 11 所示。土槽试验动力由 12 kW 的试验电动车提供,该电动车可以根据需求调整功率,工作性能稳定。

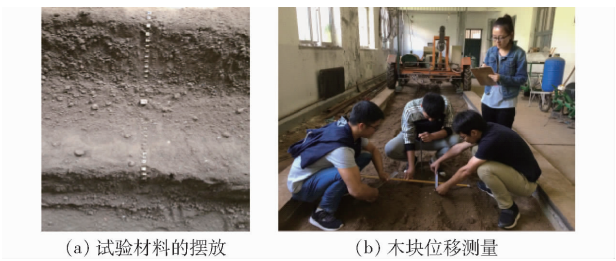


图 11 土槽试验
Fig. 11 Soil bin test

3.1.2 试验结果分析

在试验后将埋在地表下的试验材料挖出,并记录其所在的位置,试验中以标志点为原点,电动车前进方向作为 Y 轴的正方向;试验材料摆放所在的直线作为 X 轴的方向;垂直于地面的方向作为 Z 轴的

方向。根据两种起垄培土器装置试验所得数据,作出其在 XOY 平面和 XOZ 平面的位移,如图 12b 所示。对于曲面型起垄装置其分土板由曲面楔子型构成。其在 XOZ 与 XOY 平面的位移如图 12a 所示。可见在 XOZ 平面内,木块左右翻转较大,且在 X 轴的位移也比较明显,土壤发生明显的横向运动,且位移点聚集,位移后的木块位置分布紧密。从 Z 轴方向来看,多数被埋入土内,在新垄高度的中间位置。因为起垄装置为曲面楔子型构成,其铲尖与起垄装置壁之间由曲线过渡,所以其运动轨迹在 XOY 平面内呈现连续的曲线,工作时,土壤干湿分离,起垄工作仅仅将干土推向两侧形成新垄,潮湿的土壤仍然在底部,没有进行翻转。同时,在其工作时,土粒运动呈聚集趋势,工作后起垄效果明显,满足设计技术要求。而平面楔子型起垄装置,由于其起垄装置由平面构成,导致其工作面不连续,有断裂现象。因而造成干湿土相混合,湿土被翻在土壤表面,影响土壤的蓄水保墒能力。同时,在其工作时,土壤横向位移较小,且土粒位移较为分散,导致作业起垄的垄型高

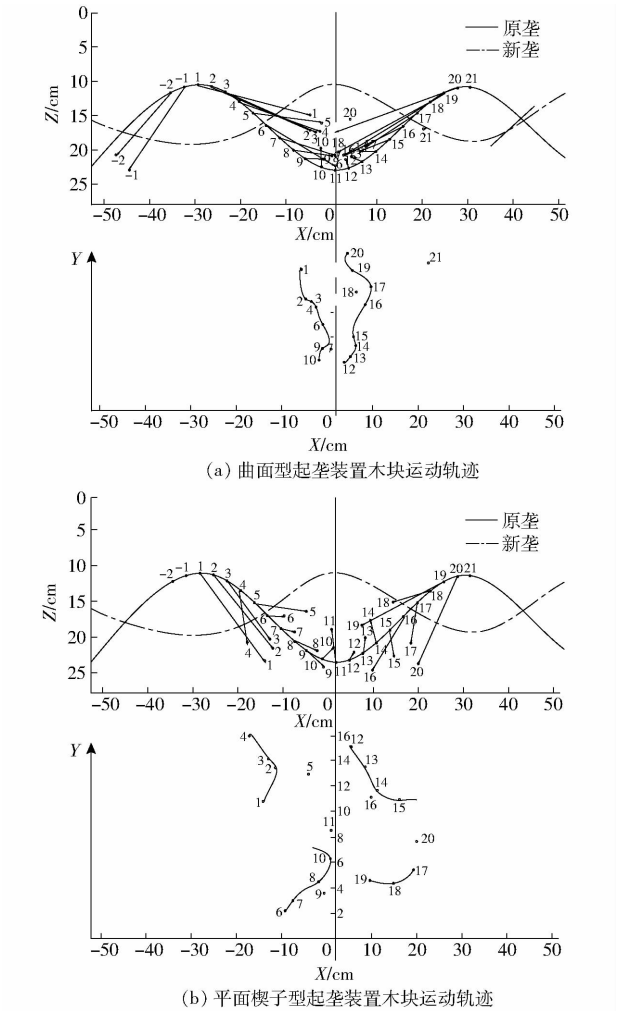


图 12 起垄装置工作时土粒运动轨迹对比试验结果
Fig. 12 Comparison test result of soil particle trajectory during ridge device operation

度不够。无论是从作业效果还是利于土壤的蓄水保墒能力来看,在起垄作业中,由曲面楔子型构成的起垄装置要优于由平面楔子型构成的起垄装置。垄距为 550 mm,垄底平均宽度为 12 cm,垄顶平均宽度为 18 cm,平均垄高为 20 cm,垄壁土壤自然休止角为 45°,实现了垄沟与垄台的互换。

3.2 田间试验

为了验证机具能够在辽西褐土区不同工况下满足作业要求,进行最佳工作参数试验。田间试验主要是为了测试机具的工作效果和能耗,机具的工作效果主要是土壤在机具行进过程中抛飞的距离应尽量小,机具的工作能耗指标为机具工作阻力,也应尽量小,影响这两个指标的因素主要有机具前进速度、工作深度和秸秆覆盖量,其他的因素对机具的工作效果和工作阻力影响较小。在控制其他因素不变的条件下,以机具前进速度、工作深度和地表玉米秸秆覆盖量为试验因素,以起垄最大高度和工作阻力为试验指标,进行三因素五水平二次回归正交组合试验。机具田间试验如图 13 所示。试验因素编码如表 3 所示。

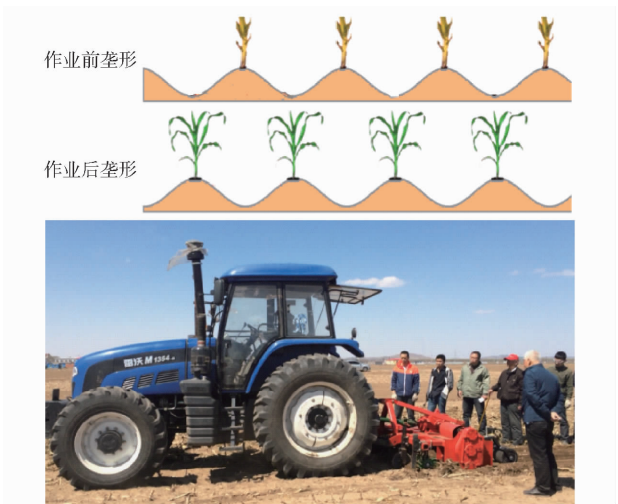


图 13 机具田间试验

Fig. 13 Machine field test

表 3 试验因素编码

Tab.3 Coding for factors

编码	因素		
	机具前进速度	起垄装置工作深度	秸秆覆盖量
	$x_1/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	x_2/cm	$x_3/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$
-1.353	6.00	13.23	0.73
-1	6.26	15.00	0.80
0	7.00	20.00	1.00
1	7.74	25.00	1.20
1.353	8.00	26.77	1.27

试验以机具所受工作阻力和起垄最大高度为评价指标。起垄最大高度即由卷尺测定土壤工作后形

成的垄高 Y_1 。使用 QLLY 型传感器进行工作阻力的测定。在机具工作时拉力传感器将收集到的信息转换为电信号,便携式计算机接收到这些电信号,并将这些电信号进行分析计算转化为一段时间内机具前进时牵引阻力的平均值 Y_2 。根据以上对三因素五水平二次回归正交组合试验方案的设计,进行 17 次试验,试验结果如表 4 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Experimental scheme and results

序号	X_1	X_2	X_3	起垄最大高度/cm	工作阻力/kN
1	0	0	0	24.3	13.1
2	1	1	1	21.5	18.8
3	1	1	-1	24.2	16.5
4	-1	1	-1	26.4	12.6
5	0	-1.353	0	20.4	12.3
6	1	-1	1	21.7	14.3
7	-1	1	1	27.5	15.7
8	0	0	1.353	23.9	16.1
9	0	1.353	0	26.1	16.5
10	0	0	0	24.8	12.9
11	1	-1	-1	22.1	14.4
12	-1	-1	1	23.8	15.0
13	0	0	-1.353	27.6	12.1
14	-1.353	0	0	28.1	14.2
15	1.353	0	0	23.2	16.4
16	-1	-1	-1	27.3	12.6
17	0	0	0	24.1	12.7

运用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析,剔除不显著项,可得起垄最大高度的回归方程为

$$Y_1 = 473.75 - 480.99x_1 - 9.64x_2 - 173.92x_3 - 4.04x_1x_2 - 52.88x_1x_3 + 0.13x_2x_3 + 281.42x_1^2 + 0.32x_2^2 + 125.73x_3^2 \quad (27)$$

对起垄最大高度回归方程的显著性进行检验,结果如表 5 所示。

表 5 起垄最大高度方差分析

Tab.5 Variance analysis of maximum distance of cast soil

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3 324.75	9	369.42	11.47	0.002 0
残差	225.37	7	32.20		
失拟	220.70	5	44.14	18.92	0.051 0
误差	4.67	2	2.33		
总和	3 550.12	16			

根据分析可知,模型 $P < 0.01$,表明此模型极为显著;失拟项 $P > 0.05$,表明失拟项 F 的检验结果不为显著,该分析结果表明回归方程的拟合程度良好。

同理可得工作阻力的回归方程

$$Y_2 = 125.97 - 154.75x_1 - 2.48x_2 - 1.99x_3 + 1.13x_1x_2 - 15.87x_1x_3 + 0.39x_2x_3 + 62.09x_1^2 + 0.02x_2^2 + 9.85x_3^2 \quad (28)$$

对工作阻力回归方程的显著性进行检验,结果如表6所示。

表6 工作阻力方差分析

Tab.6 Variance analysis of working resistance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	57.14	9	6.35	15.19	0.000 8
残差	2.93	7	0.42		
失拟	2.85	5	0.57	14.23	0.067
误差	0.08	2	0.04		
总和	60.06	16			

根据分析可知,模型 $P < 0.01$,表明此模型极为显著;失拟项 $P > 0.05$,表明失拟项 F 的检验结果不显著,该分析结果表明回归方程的拟合程度良好。

根据回归方程得到响应曲面,可得到各因素与指标的关系。固定一个因素于零水平,可看出其他两因素对指标的影响,试验因素对起垄最大高度的影响如图14所示,试验因素对工作阻力的影响如图15所示。

根据图14可得出,机具前进速度对起垄最大高度影响最为显著,工作深度和秸秆覆盖量影响程度依次递减,起垄最大高度随机具前进速度的增大而减小。当秸秆覆盖量和工作深度接近零水平,机具前进速度较小时,起垄最大高度较大。

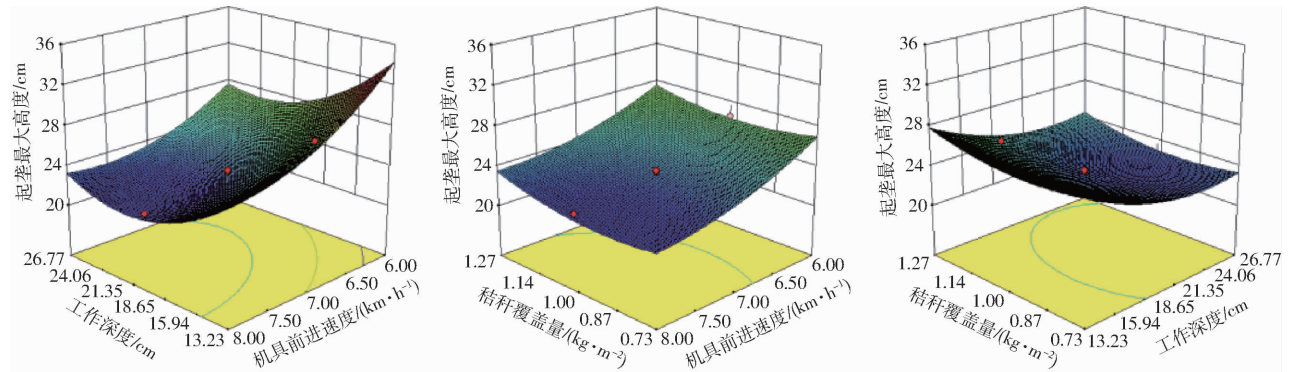


图14 试验因素对起垄最大高度影响的响应面

Fig. 14 Response surfaces of impact of factors on maximum distance of cast soil

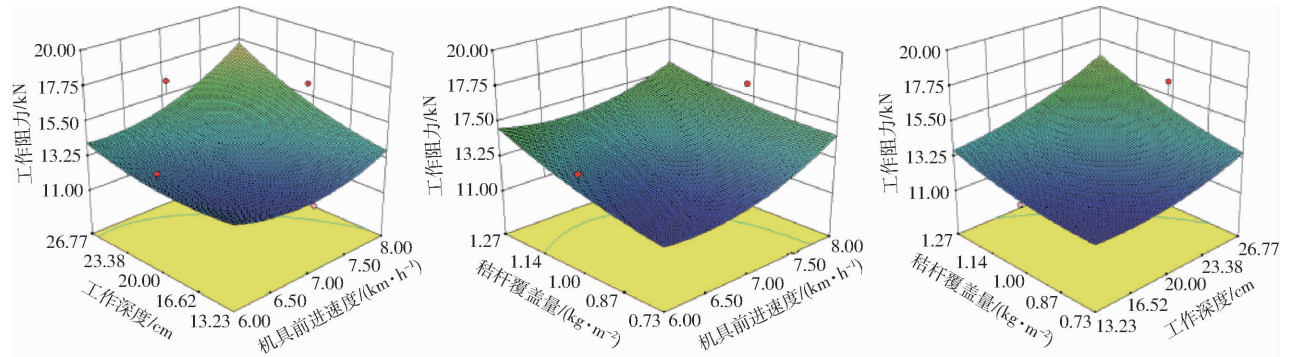


图15 试验因素对工作阻力影响的响应面

Fig. 15 Response surfaces of impact of factors on working resistance

根据图15可看出,秸秆覆盖量对工作阻力影响最为显著,工作深度和机具前进速度影响程度依次递减,工作阻力随秸秆覆盖量增大而增大。当工作深度和机具前进速度接近零水平,秸秆覆盖量较低时,工作阻力较小。

根据上述所建立的数学模型,利用 Design-Expert 软件优化求解,得出各因素最优参数组合。以起垄最大高度和最小工作阻力为评价指标,建立数学模型

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 6.00 \text{ km/h} \leq x_1 \leq 8.00 \text{ km/h} \\ 13.23 \text{ cm} \leq x_2 \leq 26.77 \text{ cm} \\ 0.73 \text{ kg/m}^2 \leq x_3 \leq 1.27 \text{ kg/m}^2 \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

根据公式(29)求得最优解,最优作业参数为:机具前进速度为6.01 km/h,工作深度为22.15 cm,秸秆覆盖量为0.77 kg/m²,起垄最大高度为24.08 cm,工作阻力为12.04 kN。考虑到试验的可

操作性,将优化的试验条件调整为:机具前进速度为 6 km/h,工作深度为 22.2 cm。试验重复 3 次,起垄最大高度为 24.15、24.07、23.93 cm,取平均值为 24.05 cm,与预测结果 24.08 cm 相近,垄距为 550 mm,垄底平均宽度为 12 cm,垄顶平均宽度为 18 cm;工作阻力为 12.08、12.06、12.10 kN,取平均值为 12.08 kN,与预测值 12.04 kN 相近,试验指标满足设计要求与褐土区合理耕层构建要求。

4 结 论

(1)根据辽西褐土区合理耕层构建技术要求,研制了 1MXQ-4 型灭茬旋耕起垄联合作业机,在一次作业中可完成深松、灭茬旋耕、起垄、覆土镇压等多项功能。实现垄沟垄台互换功能,改善土壤的蓄水保墒能力,为玉米播种创造良好的土壤工况条件。

(2)通过对深松灭茬旋耕装置的动力学分析确

定了灭茬旋耕装置的最小转速为 210 r/min,灭茬入土深度为 8 cm,旋耕碎土深度为 10 cm。通过对起垄铲培土板工作曲面形成原理的研究,确定了起垄装置结构参数。

(3)通过土槽试验对比曲面楔子型培土器和平面楔子型培土器工作时土粒运动轨迹分析,得出曲面楔子型培土器工作性能优于平面楔子型培土器工作性能,实现了垄沟垄台互换功能。

(4)通过田间试验研究,利用 Design-Expert 软件对机具工作参数求解和实际工作情况验证试验得到最佳作业参数:机具前进速度为 6 km/h,起垄装置工作深度为 22.2 cm,秸秆覆盖量为 0.77 kg/m²时,机具起垄最大高度为 24.05 cm,垄距为 550 mm,垄底平均宽度为 12 cm,垄顶平均宽度为 18 cm,工作阻力为 12.08 kN。可满足辽宁省西部褐土区垄台垄沟互换土壤耕作合理耕层构建技术指标要求。

参 考 文 献

- [1] 张凯. 辽西褐土耕层结构障碍因素分析及其耕作培肥措施研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
ZHANG Kai. Analysis of factors in cinnamon topsoil structure and the research on the measures of tillage and fertilizing[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2016. (in Chinese)
- [2] 徐缓. 褐土容重-紧实度-水分动态变化及对玉米生长的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.
XU Huan. Dynamic change if bulk density,compactness and wayer content of cinnamon soilangite effects on maize growth[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2017. (in Chinese)
- [3] 吕品衡. 不同耕作方式对辽西褐土团聚体粒径分布及其有机碳氧化稳定性影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
LÜ Pinheng. Different tillage methods on Western Liaoning brown soil aggregate size sistribution and its organic carbon oxidation stability influence[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2016. (in Chinese)
- [4] 梁卫,袁静超,张洪喜,等. 东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展[J]. 东北农业科学,2016,41(2):44-49.
LIANG Wei,YUAN Jingchao,ZHANG Hongxi,et al. Research progress on mechanism and related technology of corn straw returning in Northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016,41(2):44-49. (in Chinese)
- [5] 于寒,梁炬赫,张玉秋,等. 不同秸秆还田方式对玉米根际土壤微生物及酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(3):305-311.
YU Han,LIANG Xuanhe,ZHANG Yuqiu,et al. Effects of different straw returning modes on the soil microorganism and enzyme activity in corn field[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015,32(3):305-311. (in Chinese)
- [6] 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5):1-21.
WANG Jinwu,TANG Han,WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):1-21. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)
- [7] 白伟,孙占祥,郑家明,等. 辽西地区土壤耕层及养分状况调查分析[J]. 土壤,2011,43(5):714-719.
BAI Wei,SUN Zhanxiang,ZHENG Jiaming,et al. Soil plough layers and soil nutrients in Western Liaoning[J]. Soils, 2011,43(5):714-719. (in Chinese)
- [8] 邹洪涛,王胜楠,闫洪亮,等. 秸秆深还田对东北半干旱区土壤结构及水分特征影响[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(2):52-60.
ZOU Hongtao,WANG Shengnan,YAN Hongliang,et al. Effects of straw deep returning on soil structure oisturein semiarid region of Northeast China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2014,32(2):52-60. (in Chinese)
- [9] 裴久渤. 玉米秸秆碳在东北旱田土壤中的转化与固定[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2015.
PEI Jiubo. Transformation and fixation of maize straw cabon in the dryland soils of Northeast China[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University,2015. (in Chinese)
- [10] 王喜艳,窦森,张恒明,等. 玉米秸秆持水深埋对辽西瘠薄耕地土壤养分及玉米产量的影响[J]. 西北农业学报,2014,23(5):76-81.
WANG Xiyan,DOU Sen,ZHANG Hengming,et al. Effects of waterlogged maize stalk deep returning on soil nutrients and maize yields of barren farmland in west Liaoning Province[J]. Acta Agriculturae Borealioccidentalis Sinica,2014,23(5):76-81. (in Chinese)
- [11] 郑洪兵,齐华,刘武仁,等. 玉米农田耕层现状、存在问题及合理耕层构建探讨[J]. 耕作与栽培,2014(5):39-42.
ZHENG Hongbing,QI Hua,LIU Wuren,et al. Present and problem of tillage layer of maize cropland and discussion of optimum tillage layer[J]. Tillage and Cultivation,2014(5):39-42. (in Chinese)
- [12] 吕开宇,仇焕广,白军飞,等. 中国玉米秸秆直接还田的现状与发展[J]. 中国人口资源与环境,2013,23(3):171-176.

- LÜ Kaiyu, QIU Huangang, BAI Junfei, et al. Development of direct return of corn stalk to soil: current status, driving forces and constraints[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(3): 171–176. (in Chinese)
- [13] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 155–163. ZHAO Yali, XUE Zhiwei, GUO Haibin, et al. Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 155–163. (in Chinese)
- [14] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2012, 21(3): 242–247. GAO Xiangzhao, MA Wenqi, MA Changbao, et al. Analysis on the current status of utilization of crop straw in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 21(3): 242–247. (in Chinese)
- [15] 张居敏. 水田高茬秸秆旋耕埋覆机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014. ZHANG Jumin. Study on mechanism of high stubble burying rotary tiller for wet land[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [16] 吕秋立, 林静, 马铁, 等. 辽西褐土区灭茬深松起垄联合作业机的设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 74–78. LÜ Qiuli, LIN Jing, MA Tie, et al. Design of stubble subsoiling ridge combined working machine in cinnamon soil zone of western[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 74–78. (in Chinese)
- [17] 高焕文, 李洪文, 李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 43–48. GAO Huanwen, LI Hongwen, LI Wenying. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43–48. (in Chinese)
- [18] 王志穷, 王维新, 李霞, 等. 保护性耕作条件下深松技术的国内外发展现状[J]. 农机化研究, 2016, 38(6): 253–258. WANG Zhiqiong, WANG Weixin, LI Xia, et al. Development status of subsoiling at home and abroad under conservation tillage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(6): 253–258. (in Chinese)
- [19] 何进, 李洪文, 陈海涛, 等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 1–19. HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1–19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
- [20] 钱凤魁, 黄毅, 董婷婷, 等. 不同秸秆还田量对旱地土壤水肥和玉米生长与产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 61–65. QIAN Fengkui, HUANG Yi, DONG Tingting, et al. Effect of crop residue incorporation on soil moisture and nutrient and maize growth and yield of arid farmland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 61–65. (in Chinese)
- [21] 金亮, 赵亚祥, 田耘. 深松旋耕联合作业机的研究现状及问题浅析[J]. 农业与技术, 2014, 34(4): 53–54.
- [22] 赵大勇, 许春林, 刘显耀, 等. 1ZML-210 深松型联合整地机的研制[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2011, 23(6): 12–14. ZHAO Dayong, XU Chunlin, LIU Xian Yao, et al. Study on type machine of 1ZML-210 deep loosening combined tilling machine [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2011, 23(6): 12–14. (in Chinese)
- [23] 孙伟, 田斌, 杨小平, 等. 1ZSZL-3000 型深松灭茬整地联合作业机的设计与研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(12): 11–15. SUN Wei, TIAN Bin, YANG Xiaoping, et al. Study and design of 1ZSZL-3000 subsoiling and stubbling tillage combined machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(12): 11–15. (in Chinese)
- [24] 潘世强, 金亮, 赵亚祥, 等. SZL-2 型深松施肥起垄联合作业机的研制及试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 9–12. PAN Shiqiang, JIN Liang, ZHAO Yaxiang, et al. Development and experiment investigation of SZL-2 type operation machine of deep scarification-fertilization-ridging combine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 9–12. (in Chinese)
- [25] 毛俐. 灭茬深松旋耕起垄机的研究[J]. 农业科技与装备, 2012(3): 23–24. MAO Li. Research on stubble cleaning and deep plowing and rotary tillage ridger[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(3): 23–24. (in Chinese)
- [26] 窦森, 陈光, 关松, 等. 秸秆焚烧的原因与秸秆深还技术模式[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(2): 127–133. DOU Sen, CHEN Guang, GUAN Song, et al. Reasons for corn stover burning in fields and technical models for its deep incorporation to subsoil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2017, 39(2): 127–133. (in Chinese)
- [27] 王胜楠, 邹洪涛, 张玉龙, 等. 秸秆集中深还田两年后对土壤主要性状及玉米根系的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 68–78. WANG Shengnan, ZOU Hongtao, ZHANG Yulong, et al. Effects of deeply and concentrated returned straw on soil main properties and corn root system[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 68–78. (in Chinese)
- [28] 杜长征. 我国秸秆还田机械化的发展现状与思考[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 234–236. DU Changzheng. Present status and consideration about straw returning mechanization in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 234–236. (in Chinese)
- [29] 战秀梅, 彭靖, 李秀龙, 等. 耕作及秸秆还田方式对春玉米产量及土壤理化性状的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(3): 204–209. ZHAN Xiumei, PENG Jing, LI Xiulong, et al. Effects of tillage and crop residues incorporation on spring maize yield and physical and chemical properties of soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(3): 204–209. (in Chinese)
- [30] 林静, 李凯, 李宏哲, 等. 东北平原棕壤土区合理耕层耕作模式与配套机具研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 7–16. LIN Jing, LI Kai, LI Hongzhe, et al. Research on tillage mode and matching machine of optimum tillage layer of brown soil zone in Northeast Plain[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 7–16. (in Chinese)
- [31] 林静, 王磊, 李宝筏, 等. ZZZ-3 型深松培垄施肥联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 9–17. LIN Jing, WANG Lei, LI Baofa, et al. Design and test of ZZZ-3 type deep scarification-terrace ridge-fertilization combine intertill machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 9–17. (in Chinese)