

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.006

反旋深松联合作业耕整机设计与试验

郑侃 何进 李洪文 赵宏波 胡宏男 刘文政

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对现有深松旋耕联合作业机多为深松部件在前、旋耕部件在后的组合结构,较少考虑各工作部件作业时之间的相互影响,本文基于深松部件、旋耕部件作业之间的交互作用,设计一种用于深耕的反旋深松联合作业耕整机,通过旋耕、深松、镇压多工序实现表层土壤细碎、秸秆埋覆,深层土壤疏松目的。整机以提高作业质量、减少作业阻力为设计目标,运用离散元仿真与正交试验、有限元仿真结合进行整机参数优化。离散元仿真结果表明:机具作业速度 v_m 为 1.8 km/h、刀轴转速 n 为 350 r/min、旋耕刀类型 X 为 IIT195 弯刀时,机具作业壅土量为 5 283 个土壤颗粒,植被覆盖率为 98.37%,此时综合作业质量较优;有限元仿真结果验证了深松铲设计强度满足作业要求。以较优参数组合为基础的田间试验结果表明:反旋深松联合作业耕整机旋耕深度、深松深度、地表平整度、土壤膨松度分别为 182.8 mm、388.4 mm、18.3 mm、17.22%;旋耕深度稳定性、深松深度稳定性、植被覆盖率均在 90% 以上,完全满足深层土壤整地需求;与深松旋耕联合整地机相比,反旋深松联合作业耕整机在不影响作业效果前提下,提高了耕深稳定性、植被覆盖率,同时使牵引阻力降低了 16.21%,作业稳定性、可靠性较好。

关键词: 深松; 旋耕; 联合作业; 离散元法

中图分类号: S222.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)08-0061-11

Design and Experiment of Combined Tillage Implement of Reverse-rotary and Subsoiling

ZHENG Kan HE Jin LI Hongwen ZHAO Hongbo HU Hongnan LIU Wenzheng

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering most of the present combined machines of rotary and subsoiling usually place subsoiling components in front of rotary components, without the research of interaction between these two working components, based on the interaction between subsoiling and rotary tillage components, a combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling for deep ploughing was designed and developed. The overall implement aimed at deepening the working depth, improving the working quality and reducing tillage resistance, with focus on the interaction research of the process of rotary tillage and subsoiling components. Whole implement parameter was optimized by discrete element method (DEM), orthogonal experiment and finite element analysis (FEM) simulation. As indicated in the results of simulated orthogonal experiment, working quality was the best when operation speed was 1.8 km/h, rotary speed was 350 r/min, rotary blade type X was IIT195, in which case particle amount of heap soil quantity was 5 283, straw coverage was 98.37%; the results of DEM demonstrated that the strength met the working requirements. Field test based on optimal parameters showed that rotary tillage depth was 182.8 mm, subsoiling depth was 388.4 mm, surface flatness was 18.3 mm and soil bulkiness was 17.22% for the combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling; rotary tillage depth stability, subsoiling depth stability and straw coverage were all beyond 90%, which completely met the soil preparation requirement in deep layer. Compared with combined subsoiling and rotary cultivator, this combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling had better consistence of working depths, higher vegetation coverage and the tillage resistance was reduced by 16.21% under qualified working quality, and it had high working stability and reliability. The development of this implement can provide reference for deep layer cultivation and tillage resistance combined cultivator in arid areas of North China.

Key words: subsoiling; rotary tillage; combined working; discrete element method

收稿日期: 2016-11-24 修回日期: 2016-12-16

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介: 郑侃(1987—),男,博士生,主要从事保护性耕作深松作业机具研究,E-mail: zhengkan0219@163.com

通信作者: 何进(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: hejin@cau.edu.cn

引言

土地耕整作业为创造良好的播种和栽植苗床做准备,是整个农业生产过程中一个重要环节^[1]。联合耕整作业机械在适宜条件下一次作业即可完成耕地、整地等多项工序,达到播种前的苗床要求,且具有减少农具对土壤团粒结构的破坏,提高机具作业效率,节省燃料降低作业成本等优点^[2]。近年来,随着我国大功率动力机械的发展,联合耕整作业机械已成为农业耕作机械发展方向。

深松旋耕联合整地机采用深松、旋耕两项核心技术,工作部件主要有深松铲、旋耕刀辊等部件。深松部件可打破坚硬的犁底层、减少水土流失、改善作物根系生长环境,有利于深根系作物产量的提高^[3-5],常见深松铲的结构有凿式深松铲、V型全方位深松铲、侧弯深松铲;旋耕部件碎土能力强,作业后表土细碎、地表平整^[6-7],常见的旋耕部件有卧式旋耕部件与立式旋耕部件。在深松、旋耕部件基础上增加灭茬、粉碎、起垄、镇压等部件,可将已有的深

松旋耕联合作业机分为:深松旋耕联合整地作业机^[8]、深松旋耕起垄联合作业机^[9]、灭茬深松旋耕起垄联合作业机^[10]。但深松旋耕联合作业机报道中,多为深松部件在前、旋耕部件在后的组合,较少考虑各工作部件作业之间的相互影响。

本文基于深松部件、旋耕部件作业过程中的交互作用^[11],以提高作业质量、减少作业阻力为设计目标,设计一种适用于华北平原壤土区秸秆还田的反旋深松联合作业耕整机,为我国深层耕作、低阻力联合耕作机械的设计提供技术支撑。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构与主要结构参数

反旋深松联合作业耕整机由拖拉机三点悬挂架连接,主要由旋耕部件、深松部件、挡草栅条、镇压辊、限深轮、挡土辊及变速箱等部件组成,如图1所示。整机可通过限深轮和悬挂架上拉杆共同调节作业深度,一次作业可完成旋耕、深松、镇压等多项工序。其主要参数如表1所示。

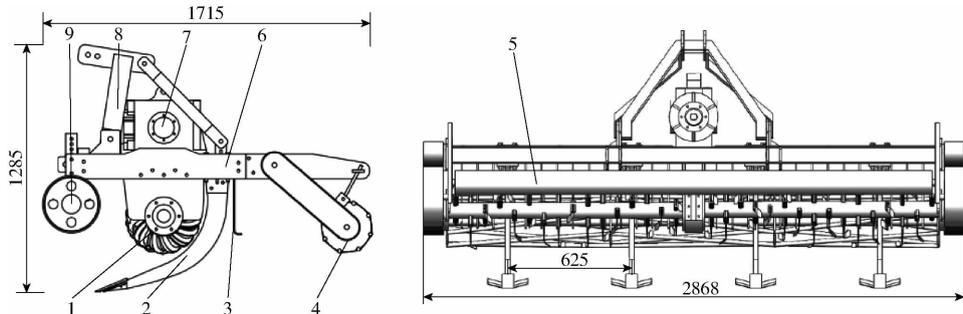


图1 反旋深松联合作业耕整机结构简图

Fig. 1 Sketch map of combined tillage machine of submerged reverse-rotary and subsoiling

1. 旋耕部件 2. 深松部件 3. 挡草栅条 4. 镇压辊 5. 挡土辊 6. 机架 7. 变速箱 8. 悬挂架 9. 限深轮

表1 反旋深松联合作业耕整机主要参数

Tab. 1 Parameters of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling

参数	数值	参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 715 × 2 868 × 1 285	深松深度/mm	≤450
整机质量/kg	811	旋耕深度/mm	≤250
作业幅宽/mm	2 500	挡土辊直径/mm	120
深松铲数	4	镇压辊类型	幅条型
深松铲尖类型	凿形铲	限深方式	限深轮
深松翼铲类型	双翼铲	配套动力/kW	≥66.2
深松铲间距/mm	625	作业速度/(km·h ⁻¹)	1.80 ~ 3.96

1.2 工作原理

整机采用中间齿轮传动,拖拉机动力输出轴输送动力经万向联轴器至变速箱,再经变速箱中间齿轮变速后驱动旋耕刀轴转动。工作时,深松部件疏松旋耕部件前方的深层土壤,以达到打破犁底层、降低旋耕阻力的目的;旋耕刀轴反旋作业(与拖拉机驱动轮旋转方向相反),破碎深松后

的土壤,并利用挡草栅条筛选大土块及秸秆,细碎的土壤通过挡草栅条覆盖表层,实现埋覆秸秆残茬功能。机具前端的挡土辊可减少旋耕部件前方的壅土量,降低能耗;镇压辊则对深松、旋耕作业后的地表进行镇压。整机作业后形成有利于作物生长的下粗上细、上虚下实、透气性良好的土壤耕作层。

2 关键部件设计

2.1 基于交互作用的整体结构设计

深松部件与旋耕部件的相对位置、机具重心的水平位置影响整机工作的牵引阻力、作业质量。因此,需分析深松与旋耕作业过程的交互作用及机具重心的水平位置,以确定整机结构。

2.1.1 深松部件与旋耕部件的相对位置确定

秸秆还田条件下华北平原壤土区特点为:壤土黏粒、粉粒、砂粒含量适中,通气透水、保水保温性良好,水、气、光、热与作物生长需求基本同步,是深根系作物栽培的理想土壤^[12];壤土与旋耕刀、深松铲摩擦因数较小,土壤含水率适中,有利于土壤破碎,为深层耕作提供良好的基础条件;华北平原种植模式多为玉米小麦一年两熟,耕作周期较短,秸秆量大、杂草多,机具耕作易堵塞缠绕,增加了耕整机具研究难度。深松与旋耕配合作业,能较好地混埋秸秆残茬以有利于秸秆腐烂与下茬作物播种,同时提高机具作业效率、降低作业成本。图 2 所示为常见先深松后旋耕组合结构及深松旋耕交互组合结构作业过程分析图。整机沿 x 轴正方向运动,假设旋耕作业为正转旋耕(图 2 中旋耕刀顺时针旋转)。先深松后旋耕组合结构、深松旋耕交互组合结构中深松部件所受土壤阻力在 x 轴上分力分别为 F 、 F' 。由于旋耕刀左、右对称排列,因此沿轴向阻力相互抵消,两者中的旋耕部件所受水平土壤阻力在 x 轴方向上分力分别为 P 、 P' 。根据平面力系平衡条件,在 x 轴上可得两种机具的牵引阻力为

$$\begin{cases} T = F - P \\ T' = F' - P' \end{cases} \quad (1)$$

式中 T ——先深松后旋耕组合结构水平方向牵引阻力

T' ——深松旋耕交互组合结构水平方向牵引阻力

由图 2a 可知,常见先深松后旋耕组合结构的深松部件在旋耕部件正前方。机具工作时,深松部件在未耕作区进行土壤深松作业,后续旋耕装置将一

定深度的深松区土壤进行松碎。该结构主要优点为深松铲打破犁底层,降低了未耕作区的土壤容重和紧实度,减少了后续旋耕作业的阻力。但深松铲作业阻力较大,且易缠绕秸秆、杂草,增加工作阻力,易在作业地表拖出沟壑,耕后地表不平整,降低整机作业质量,不利于在秸秆量大的条件下作业。图 2b 为深松旋耕交互组合结构,其结构为旋耕部件位于深松铲柄弯弧斜上方,深松铲尖及翼铲置于旋耕部件前方。作业时,深松铲尖与翼铲对旋耕部件前部未耕作区进行土壤疏松,随后旋耕部件进行土壤破碎平整,并将根茬粉碎与秸秆、土壤均匀混埋。深松铲柄通过旋耕作业区,降低了深松阻力,减少了深松铲秸秆缠绕,提高了整机作业稳定性。由图 2 结合式(1)可知,两种组合结构中的旋耕部件均在已深松区域作业。若秸秆覆盖量、杂草相对较少,且覆盖均匀时,两种组合结构可以顺利通过秸秆、杂草覆盖地表。如果秸秆覆盖量大、杂草较多,先深松后旋耕组合结构容易出现堵塞,影响机具正常工作,而深松旋耕交互组合结构旋耕部件将根茬、杂草粉碎并与土壤混埋,减少了堵塞。由以上分析可得,两种组合结构正常工作时,秸秆、杂草流动性较强对旋耕部件水平阻力影响较小, P 、 P' 近似相同;机具发生堵塞,使机具无法工作情况,本设计暂不考虑。深松旋耕交互组合结构中,部分深松铲柄位于旋耕部件的后方,作业时通过已旋耕后的松碎土壤,同时可有效减少秸秆缠绕,使得深松部件的阻力降低,由此可得深松阻力 F' 小于 F 。因此,深松旋耕交互组合结构水平方向牵引阻力 T' 小于先深松后旋耕组合结构水平方向牵引阻力 T 。综合以上分析,深松旋耕交互组合结构除具有先深松后旋耕组合结构的优点外,还减少了秸秆、杂草堵塞,降低了作业阻力,在作业参数相同时,随着旋耕部件作业深度的增加,深松旋耕交互组合结构减阻效果明显,更有利于华北平原壤土区秸秆还田地深层耕作。本文反旋深松联合作业耕整机选用深松旋耕交互组合结构。

2.1.2 机具重心的水平位置确定

机具重心的水平位置影响其作业稳定性。常

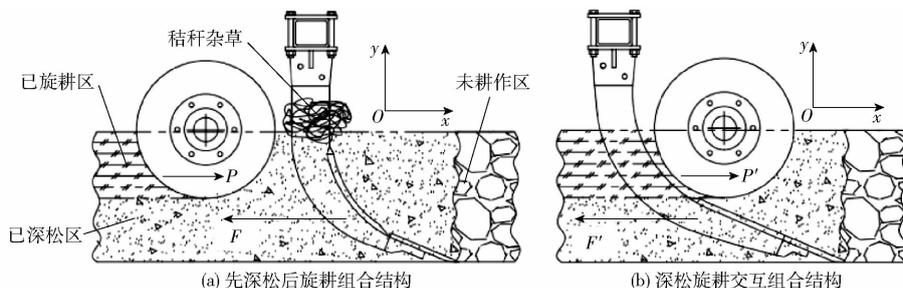


图 2 两种深松旋耕组合结构作业过程示意图

Fig. 2 Operation processes of two kinds of subsoiling rotary tillage combined structure

见的深松旋耕联合作业机,深松部件置于旋耕部件前部,由于旋耕部件比深松部件质量大,且两者重心水平距离较远,整机的重心位置更靠近旋耕部件,易使深松框架被轻微抬起,深松部件工作的耕深稳定性变差^[13]。反旋深松联合作业耕整机以变速箱为中心左右对称,各个部件重心位于整机对称面上。其中旋耕部件(包括变速箱、机架、悬挂架、挡草栅条、旋耕部件)水平方向上的重心位置,可近似认为在旋耕刀轴中心竖直线上。图3为整机重心位置示意图,建立以机具前方的下悬挂点为中心,水平方向为 x 轴、垂直方向为 y 轴的 xOy 坐标系。根据各个部件重心位置及大小不同将整机分为限深轮、挡草辊、旋耕部件、深松部件、镇压辊等5部分,利用合力矩定理,计算出整机重心的水平距离为

$$L = \frac{\sum_{i=1}^5 G_i L_i}{G} \quad (2)$$

式中 L ——整机重心的水平距离

G ——整机重量

G_i ——部件 i 的重量

L_i ——部件 i 重心的水平距离

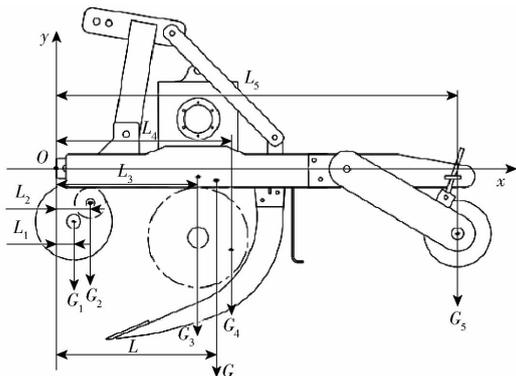


图3 机具重心位置示意图

Fig.3 Sketch of barycenter position of machine

经测定整机重量 G 为7940 N,限深轮、挡草辊、旋耕部件、深松部件、镇压辊对应的 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 分别为200、280、5770、880、810 N, L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 分别为68、133、560、689、1432 mm。将上述参数

代入式(2),可求得整机重心水平距离为635.8 mm。如图3所示,整机重心、旋耕部件重心、深松部件重心三者的水平距离较近,且整机重心介于另外两者之间,其优点是深松、旋耕部件工作时,不会出现深松铲抬起现象,耕深稳定性增强、作业更为紧凑;旋耕部件增加了深松部件的配重,提高了深松铲的入土性能。

2.2 基于交互作用的旋耕、深松部件结构设计

2.2.1 基于联合作业的旋耕部件设计

反旋深松联合作业耕整机中旋耕部件的旋转方向,影响机具碎土质量、耕深稳定性、机具振动等作业性能。旋耕部件的旋耕刀除了以刀轴轴心旋转,同时要随着机具前进作水平匀速运动。为了使旋耕刀能够有效地切削土壤,旋耕刀端点运动轨迹为余摆线,即旋耕速度比 $\lambda = R\omega/v_m > 1$,其中 R 为旋耕刀回转半径, ω 为刀轴旋转角速度, v_m 为前进速度。正、反转旋耕刀作业过程如图4所示,以旋耕刀轴旋转中心为原点 O ,建立 xOy 坐标系,正转旋耕刀旋向为顺时针;反转旋耕刀旋向为逆时针。设正转旋耕与反转旋耕部件中旋耕刀回转半径 R 、刀轴旋转角速度 ω 、前进速度 v_m 相同。参考正转旋耕刀运动分析^[14],并结合图4b反转旋耕刀运动轨迹,得出正、反转旋耕刀端点绝对速度 v_1 、 v_2 为

$$\begin{cases} v_1 = v_m \sqrt{1 + \lambda^2 - 2\lambda \sin(\omega t)} \\ v_2 = v_m \sqrt{1 + \lambda^2 + 2\lambda \sin(\omega t)} \end{cases} \quad (3)$$

正转旋耕刀由近及远切开土堡,与反转旋耕刀相反,正、反转旋耕刀切土时土堡厚度变化规律不同。取旋耕刀端点相邻轨迹线之间的单片土堡进行分析。根据图4几何关系可得旋耕刀切土过程中,正、反转旋耕堡片厚度 d_1 、 d_2 分别约为 $S \sin \delta_1$ 、 $S \sin \delta_2$,其中切土节距 S 与同一平面内旋耕刀的安装数 z 、前进速度 v_m 、刀轴旋转角速度 ω 有关; δ_1 、 δ_2 分别为正、反转旋耕刀端点轨迹线切线与 x 轴夹角,可由旋耕刀端点绝对速度沿 x 、 y 轴的分速度三角函数关系得出。因此,可得正、反转旋耕时堡片厚度 d_1 、

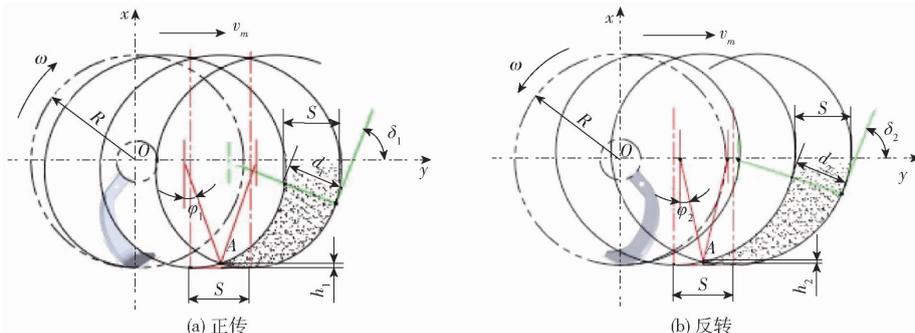


图4 旋耕刀作业过程示意图

Fig.4 Sketches of operation process of rotary blade

d_2 为

$$\begin{cases} d_1 = \frac{2\pi v_m}{z\omega} \sin \frac{\lambda \cos(\omega t)}{\sqrt{\lambda^2 - 2\lambda \sin(\omega t) + 1}} \\ d_2 = -\frac{2\pi v_m}{z\omega} \sin \frac{\lambda \cos(\omega t)}{\sqrt{\lambda^2 + 2\lambda \sin(\omega t) + 1}} \end{cases} \quad (4)$$

正、反转旋耕刀作业时刀端点的运动轨迹不同,耕作层底部形成的土壤凸起高度也不同,导致正、反转旋耕作业后耕深稳定性有差别。如图 4 所示,凸起高度等于相邻两余摆线的交点 A 到沟底的距离。鉴于旋耕刀转速较快,正、反转旋耕刀过交点 A 时的转角 φ_1 、 φ_2 较小,可近似认为 $\sin\varphi_1 = \varphi_1$ 、 $\sin\varphi_2 = \varphi_2$,结合图 4 中的几何关系,正、反转旋耕刀作业后沟底土壤凸起高度 h_1 、 h_2 计算式为

$$\begin{cases} h_1 = R \left[1 - \cos \frac{\pi}{z(\lambda - 1)} \right] \\ h_2 = R \left[1 - \cos \frac{\pi}{z(\lambda + 1)} \right] \end{cases} \quad (5)$$

如图 4 所示,单个余摆线内,旋耕刀有效切削土壤的转角 ωt 取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。由式(3)~(5)可知,正、反转旋耕刀端点绝对速度 v_1 、 v_2 ,正、反转旋耕时垡片厚度 d_1 、 d_2 ,以及正、反转旋耕刀作业后沟底土壤凸起高度 h_1 、 h_2 ,主要与前进速度 v_m 、刀轴旋转角速度 ω 、旋耕刀回转半径 R 及同一平面内旋耕刀的安装数 z 等参数相关。结合现有旋耕联合作业机^[14]与 GB/T 5668—2008《旋耕机》中幅宽为 2 500 mm 旋耕部件作业要求,设定作业速度 v_m 为 1.8~3.96 km/h;刀轴旋转角速度 ω 为 26.17~36.63 rad/s(转速 n 为 250~350 r/min);旋耕刀回转半径 R 参照 GB/T 5669—2008《旋耕机械-刀和刀座》取值 195 mm;试验地土壤类型为壤土,黏度中等、秸秆覆盖量大,为了减少旋耕部件作业过程中夹土、堵塞,同一平面内旋耕刀的安装数 z 取值为 2。若正转与反转旋耕刀 v_m 、 ω 相同,且分别取 3.96 km/h、36.63 rad/s,计算得出 λ 为 6.49,代入

式(3)~(5),可得出以下结论:①由式(3)可得,反转旋耕刀端点的绝对速度 v_1 大于反转旋耕刀端点绝对速度 v_2 。与正转旋耕比,反转旋耕增加了切土速度,可提高旋耕碎土质量、减少旋耕刀切土阻力^[15]。②由式(4)可知,反转旋耕刀切土的垡片厚度比正转旋耕刀入土时垡片厚度小,并随着转角 ωt 增加,反转旋耕刀切土的垡片厚度 d_2 逐渐增加,旋耕刀受力逐渐增加,因此减少对刀轴的冲击,使土壤因受到拉、剪方式而破坏,提高联合整地机作业稳定性且延长机具的使用寿命。③由式(5)可得,正、反转旋耕刀作业后沟底土壤凸起高度 h_1 、 h_2 分别为 2.43 mm、1.3 mm,反转旋耕作业后耕作层底部较平整,耕深稳定性较好,作业后地表平整度较优。另外与正转旋耕相比,反转旋耕覆土性能优良,有利于提高秸秆残茬覆盖率,并随着旋耕深度的增加,需要的功耗较正旋低,有利于加深旋耕作业深度^[16-17],更适用于华北平原壤土区玉米秸秆还田地深层耕作。综上所述,反旋深松联合作业耕整机旋耕部件设计为反旋。结合现有的旋耕联合作业机,本设计旋耕部件采用左、右刀轴上的旋耕刀按双头螺旋线对称排列,以抵消刀轴横向水平力,减小对刀轴端的轴承影响;同一平面方向相反的旋耕刀相位角为 180° ,同一螺旋线上的同向相邻旋耕刀升角为 72° 。旋耕刀共 64 把,左、右刀轴各 32 把;旋耕刀材料采用 65Mn 钢。

2.2.2 基于潜土反转旋耕的深松部件设计

深松、旋耕部件位置参数影响整机的工作性能。本设计中旋耕部件采用反旋,其问题是旋耕刀向前方抛土形成壅土现象,大量壅土导致旋耕刀重耕,增加旋耕机作业功耗。相关研究表明^[18-19],当旋耕部件潜土(旋耕作业深度大于旋耕刀回转半径)反旋时,有利于降低机具壅土量,且比同样条件下的正旋有效减少了作业功耗。本文为使旋耕作业深度小于旋耕刀回转半径时,也能实现旋耕部件潜土作业,需对深松部件进行设计。如图 5 所示,深松部件主要

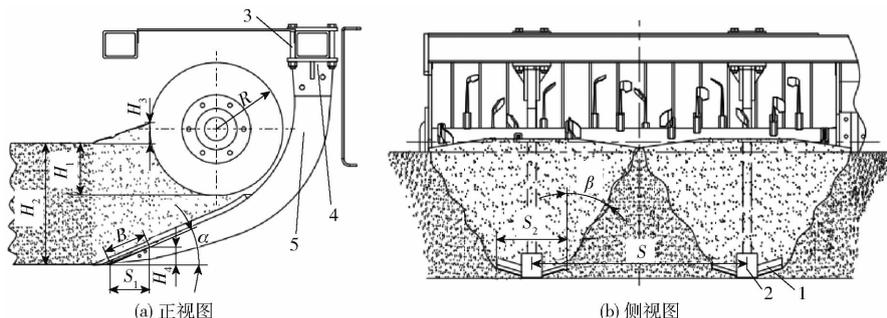


图 5 反旋深松联合作业耕整机中深松、旋耕相对位置示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of relative position of subsoiling and rotary tillage parts of subsoiling-reverse rotation combined tillage machine

1. 翼铲 2. 铲尖 3. 连接螺栓 4. 固定座 5. 铲柄

由翼铲、铲尖、连接螺栓、固定座和铲柄构成。铲尖选用凿形铲,铲尖与翼铲置于旋耕刀轨迹线前方配合打破犁底层,并将旋耕刀辊前方土壤向上抬起,使得旋耕较浅时能够实现潜土作业。由图 5a 几何关系可得

$$\begin{cases} H_3 + H_1 \geq R \\ H_3 = H_4 - h \\ H_4 = S_1 \tan \alpha \\ S_1 = B \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中}^{[20]} \quad h = S_1 \left(\frac{1}{2} \sin(2\alpha) - \sin^2 \alpha \tan \varphi \right) \quad (7)$$

式中 H_3 ——铲尖和翼铲抬起土壤实际高度
 H_1 ——旋耕部件作业深度
 H_4 ——铲尖和翼铲抬起土壤理论高度
 h ——土壤压缩高度 α ——翼铲倾角
 S_1 ——翼铲在水平面投影长度
 B ——翼铲长度
 φ ——翼铲与土壤的摩擦角

联立式(6)、(7)可得

$$B \geq \frac{R - H_1}{\cos \alpha (\tan \alpha - \sin \alpha \cos \alpha + \sin^2 \alpha \tan \varphi)} \quad (8)$$

为了保证深松铲的疏松范围,使后续旋耕部件较大范围内实现潜土作业,由图 5 可知,两翼铲间作业宽度 S_2 需满足

$$S_2 \geq S_0 - 2(H_2 - H_4) \tan \beta \quad (9)$$

式中 S_0 ——两深松铲安装距离
 H_2 ——深松作业深度
 β ——松土扇形角

由式(8)可知,当旋耕部件作业深度 H_1 小于旋耕刀回转半径 R 时,若翼铲长度 B 满足式(9)要求,旋耕部件依然能够潜土作业。长期以来,在我国华北平原壤土区旋耕机作业深度为 130 ~ 150 mm,达不到作物生长需要的农艺要求,且使土地耕层逐年上移^[21-22],因此,本设计旋耕深度 H_1 定为 180 ~ 250 mm,以满足农业生产需求。如前所述,旋耕刀回转半径 R 取 195 mm。参照文献[23],文中翼铲倾角 α 取值 23°。利用 MXD-01 型摩擦因数测量仪测定试验地壤土与翼铲的摩擦角 φ 均值为 23.12°。当旋耕深度 H_1 取最小值 180 mm 时,将上述参数代入式(8),求得 $B \geq 125.407$ mm,综合分析翼铲阻力等问题,文中翼铲长度 B 取值 125 mm。

式(9)表明两翼铲间作业宽度 S_2 与 S_0 、 H_2 、 H_4 、 β 有关。随着我国长期机械耕整地作业,土壤耕层变浅、犁底层加厚,现普遍达到 120 mm 以上^[24],严重影响土壤的透气性、透水性,本文结合试验地不同深度容重、紧实度测量结果,将深松作业深度 H_2 设为

380 ~ 450 mm;根据深松铲等间距分布,两深松铲安装距离 S_0 取为 625 mm;松土扇形角 β 近似取 22.5°^[25-26]。因此,当深松作业深度 H_2 为最小 380 mm 时,由式(6)、(9)可得所需两翼铲间作业宽度 S_2 为 350.79 mm,为了利于加工, S_2 取整 350 mm。深松铲其他结构参照 JB/T 9788—1999《深松铲和深松铲柄》,并结合壤土减阻破碎特性^[27],铲柄厚度设计为 25 mm、切削刃角为 45°;铲尖入土角为 23°、长度为 180 mm。

3 仿真分析

反旋深松联合作业耕整机采用反转旋耕,旋耕刀易将切削后的土壤抛向机具前方,形成壅土。减少机具作业时壅土量,有利于整机减少阻力、降低功耗。本文采用离散元分析软件 EDEM(英国 DEM-Solutions 公司)建立仿真土壤模型,并与正交试验设计结合进行仿真,分析反旋深松联合作业耕整机作业速度、旋耕转速、旋耕刀类型 3 个试验因素对壅土量、植被覆盖率 2 个试验指标的影响,从而优化整机作业性能。在此基础上,运用 SolidWorks Simulation 软件对深松铲进行静力学有限元分析,为后续样机试制和田间试验做准备。

3.1 离散元土壤模型建立

为了真实反映田间实际土壤,采用离散元法建立耕作层、犁底层、心土层 3 层土壤模型,并在地表均匀覆盖秸秆残茬。文中通过干筛法测量试验区土壤质地为壤土(粘粒质量分数 2.78%),土壤颗粒表面粘附力较小,具有散粒体物料特性和压缩性,同时忽略土壤模型中秸秆间的粘聚力。因此确定 Hertz-Mindlin (no slip) 为土壤与深松铲、旋耕刀,秸秆与深松铲、旋耕刀,以及秸秆间的接触模型;选用 Hysteretic Spring 接触模型和 Linear Cohesion 接触模型为土壤颗粒间接触模型。离散元仿真参数包括颗粒参数的本征参数和土壤颗粒接触参数。本研究采用实验测定、文献参考和颗粒参数标定等方法确定离散元仿真参数,其中秸秆相关仿真参数选取文献[28-29],3 层土壤模型创建过程与参数详见前期的研究^[30]。通过确定仿真接触模型及参数,并在不影响机具仿真结果条件下,同时考虑镇压辊、挡土辊、限深轮等部件对仿真结果影响较小,为了减少软件运行时间和存储空间,建立适用于反旋深松联合作业耕整机作业的离散元轻壤土虚拟土槽(3 000 mm(长) × 2 600 mm(宽) × 600 mm(高))。应用 SolidWorks 软件创建反旋深松联合作业耕整机几何仿真模型,并将几何仿真模型导入 EDEM 中。仿真土槽和几何模型如图 6 所示。

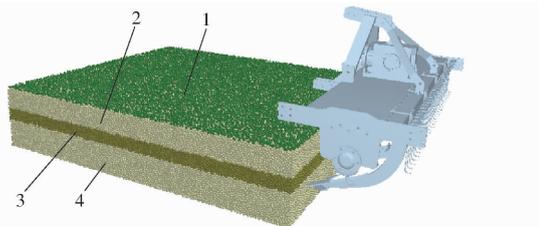


图 6 仿真土槽和几何模型

Fig. 6 Simulation soil bin and geometric model

1. 秸秆残茬 2. 耕作层 3. 犁底层 4. 心土层

3.2 基于离散元仿真旋耕部件参数优化

3.2.1 试验方法

在保证机具作业过程中土壤颗粒运动连续的前提下,设定仿真固定时间步长为 2×10^{-5} s,总仿真时间为 5 s、网格单元尺寸为 3 倍最小颗粒半径。同时设置机具旋耕作业深度为 180 mm,深松作业深度为 380 mm。结合每组因素组合方案进行 3 次重复试验,分别测试每次作业的壅土量、植被覆盖率,取平均值。

3.2.1.1 壅土量

堆积在机具前方土壤量的多少即为壅土量,机具作业的壅土量越少,表明作业抛土率效果好、功耗少。如图 7 所示,在 EDEM 软件中选取与旋耕刀轨迹线前端相切,且在地表上方的长方体区域,测量该区域土壤颗粒数量为壅土量 Y_1 。一次试验取机具作业平稳段,测量 3 次求平均值。

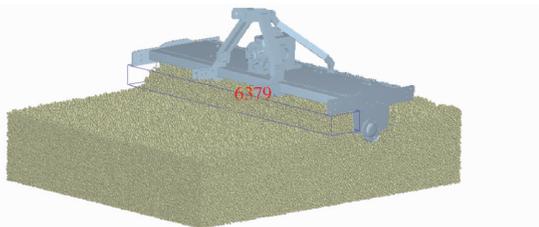


图 7 壅土量测定

Fig. 7 Determining of heap soil quantity

3.2.1.2 植被覆盖率

为了测定机具作业前后地表植被覆盖量的变化,利用 EDEM 软件网格划分功能(Grid bin group 模块)沿垂直于机具前进方向取作业平稳段,对仿真土槽进行区域划分,随机选取厚度为 40 mm、长度为 500 mm、宽度与机具幅宽相同的测量网格;提取该区域机具作业前、后植被颗粒质量分别为 W_q 、 W_h ,如图 8 所示。植被覆盖率计算式为

$$Y_2 = \frac{W_q - W_h}{W_q} \times 100\% \quad (10)$$

3.2.2 试验设计

在作业深度相同条件下,参考反旋旋耕机已有的研究成果^[31-33],机具作业壅土量与秸秆覆盖率主要与机具前进速度、刀轴转速、旋耕刀类型有关。因

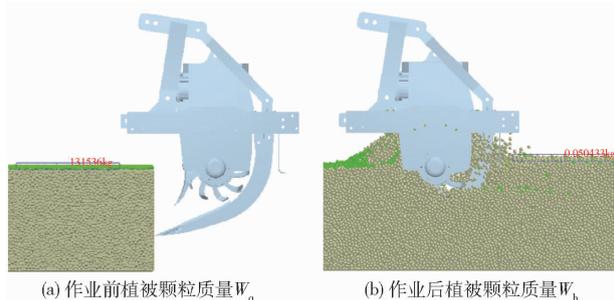


图 8 植被覆盖率测定

Fig. 8 Determining of straw coverage

此,采用三因素三水平的正交试验方法,以反旋深松联合作业耕整机作业速度、刀轴转速、旋耕刀类型为影响因素,以壅土量、秸秆覆盖率为评价指标,选用 $L_9(3^4)$ 正交表,进行反旋深松联合作业耕整机仿真。依据 2.2.1 节设定作业速度 v_m 因素水平为 1.80、2.88、3.96 km/h;刀轴转速 n 因素水平为 250、300、350 r/min。结合 GB/T 5669—2008《旋耕机械 刀和刀座》选用旋耕刀类型 X 为深耕用的 IIT195 弯刀、IIS195 凿形刀、PIIT195 直角刀。

3.2.3 试验结果与分析

应用 IBM SPSS Statistics 21 软件进行数据处理和统计分析。正交试验结果见表 2,由表中极差分析表明:各因素影响壅土量 Y_1 由大到小依次为:旋耕刀类型、刀轴转速、作业速度,较优参数组合方案为 $X_2 n_3 v_{m1}$;各因素影响植被覆盖率 Y_2 由大到小依次为:旋耕刀类型、刀轴转速、作业速度,较优参数组合方案为 $X_1 n_3 v_{m1}$ 。

由于正交试验方案未包含优化后的较优参数组合方案,为了确保优化结果可靠性,选取上述较优参数组合进行试验验证,同时,为消除随机误差,采用上述试验方法重复试验 3 次,取平均值为试验验证值。测得参数组合方案为 $X_2 n_3 v_{m1}$ 时,试验结果分别为壅土量 4 683.33 个土壤颗粒,植被覆盖率 74.56%;测得参数组合方案为 $X_1 n_3 v_{m1}$ 时试验结果分别为壅土量 5 283 个土壤颗粒,植被覆盖率 98.37%。通过对 IIS195 凿形刀作业过程分析可知,造成其作业壅土量较少、植被覆盖率较低的主要原因为 IIS195 凿形刀作业出现一定的漏耕现象,无法满足耕整机作业要求。而参数组合方案为 $X_1 n_3 v_{m1}$ 的综合作业质量优于其他参数组合下的作业性能。因此,整机采用较优组合为:作业速度 v_m 取 1.8 km/h、刀轴转速 n 取 350 r/min、旋耕刀类型 X 为 IIT195 弯刀。

3.3 基于离散元仿真深松铲有限元静力学分析

反旋深松联合作业耕整机中深松部件深松铲柄与翼铲尺寸较大,有必要进行有限元强度校核。选

表2 试验方案及结果

Tab.2 Experiment scheme and results

试验序号	作业速度 $v_m / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	刀轴转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	旋耕刀类型 X	壅土量 $Y_1 / \text{个}$	植被覆盖率 $Y_2 / \%$
1	1.80	250	IIT195 弯刀	6 380	96.08
2	1.80	300	IIS195 凿形刀	5 303.33	71.72
3	1.80	350	PIIT195 直角刀	6 135.67	98.80
4	2.88	250	IIS195 凿形刀	5 882	62.19
5	2.88	300	PIIT195 直角刀	6 733	90.98
6	2.88	350	IIT195 弯刀	5 608.33	99.72
7	3.96	250	PIIT195 直角刀	7 202	86.20
8	3.96	300	IIT195 弯刀	6 112.33	97.17
9	3.96	350	IIS195 凿形刀	4 982.67	73.28
壅土量	k_1	5 939.67	6 488	6 033.55	
	k_2	6 074.44	6 049.55	5 389.33	
	k_3	6 099	5 575.56	6 690.22	
	极差	159.33	912.44	1 300.89	
植被覆盖率	k_1	88.87	81.49	97.66	
	k_2	84.30	86.62	69.06	
	k_3	85.55	90.60	91.99	
	极差	4.57	9.11	28.59	

择深松铲单体,在机具采用较优参数组合下运用 EDEM 测量,深松铲单体作业过程中工作阻力的变化(图 9a、9b)。由图 9b 可知,旋耕部件未对前方土壤作用时,随着深松铲逐渐接触土壤,深松铲阻力逐步增加,并达到峰值,最大值为 1.704 kN。当旋耕部件入土作业时,前方土壤被疏松,深松铲阻力迅速下降,并趋于稳定。因此确定作业过程中深松铲最大受力为 1.704 kN。

利用 SolidWorks Simulation 软件对深松铲进行静力学有限元分析。本设计中铲尖和翼铲采用 65Mn 钢加工,铲尖进行热处理,硬度为 HRC52;铲

柄材料选用有一定弹性的 Q275 钢,经过热轧冷拔和热处理,硬度小于 302 HB;对深松铲进行网格划分,共划分 18 973,得到 31 831 个节点,其中对主要受力部件深松铲尖的网格划分较密;由于深松铲单体固定在机架上,所以对深松铲柄端部添加约束固定,同时对深松铲加载 1.704 kN 作业阻力,方向垂直深松铲尖、翼铲、铲柄上表面(图 9c)。深松铲有限元分析结果如图 9d、9e 所示。由分析结果可知,最大合位移位于翼铲铲尖处,位移量为 0.95 mm,处于 Q275 钢的弹性变形范围内(图 9d)。翼铲最大应力位于与铲尖的焊接处,为 1.08×10^8 Pa;铲柄最大

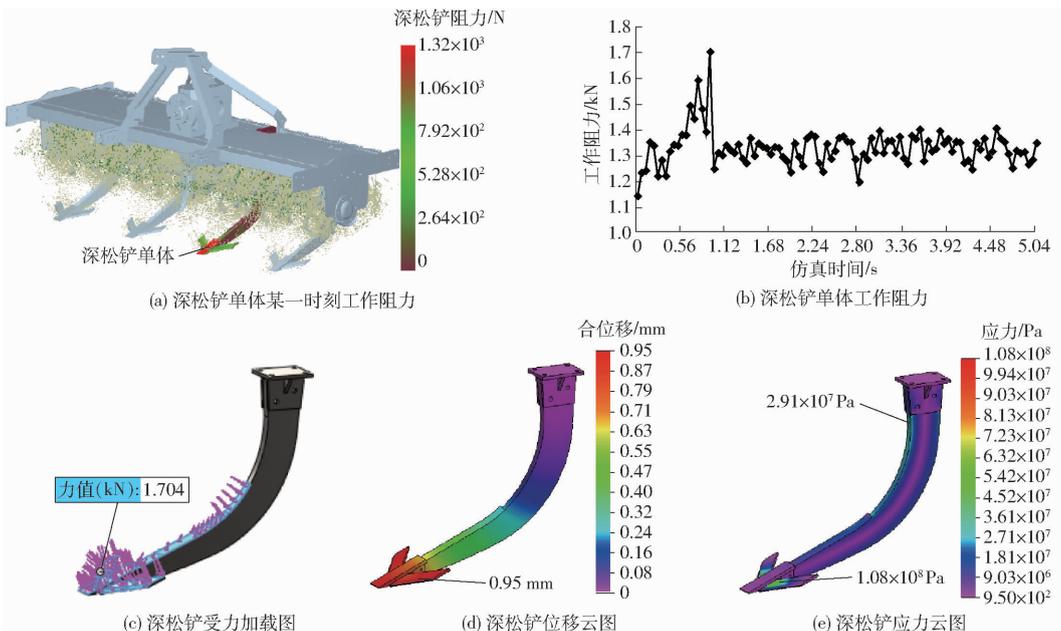


图9 深松铲有限元静力学分析

Fig.9 Finite element statics analysis of subsoiler

应力出现在与铲座连接处,为 2.91×10^7 Pa (图 9e)。分别低于 65Mn 钢的许用应力 (150 ~ 286 MPa) 和 Q275 钢的许用应力 (110 ~ 175 MPa), 因此深松铲强度满足作业要求。

4 田间试验

为了验证上述设计及离散元仿真得到的较优组合的准确性,进行反旋深松联合作业耕整机田间试验。试验以耕深、耕深稳定性、植被覆盖率、土壤膨松度、地表平整度以及牵引阻力为指标,综合评价反旋深松联合作业耕整机与深松旋耕联合整地机工作性能及耕作效果。

4.1 试验条件

田间试验于 2015 年 10 月 15 日在河北省涿州市东城坊镇 (115°56'E、39°28'N) 中国农业大学河北北部耕地保育科学观测实验站进行。试验设备主要包括雷沃 M1104 型拖拉机、反旋深松联合作业耕整机样机、深松旋耕联合整地机 (工作幅宽 2 500 mm、深松铲在旋耕部件前方、旋耕为正转、旋耕刀 IIT195 弯刀、深松铲为双翼铲)、田间综合测试车、紧实度测量仪、环刀、土壤盒、电热恒温干燥箱、卷尺、钢尺、电子秤等。测量测试区深度 0 ~ 500 mm 土壤的容重 1.54 g/cm^3 、含水率 13.17%、紧实度 3 664.13 kPa。试验区前茬作物为玉米,秸秆经过还田机粉碎、覆盖均匀,覆盖量为 1.82 kg/m^2 。

4.2 试验方法

选取地势平坦、长度为 200 m、宽度为 30 m 的试验地块,设定中间 100 m 为工作平稳区,试验区宽度 20 m 作为测量区域。测量采用 5 点取样法,测量点选取平行四边形对角线均分点。两种机具平均作业速度为 1.8 km/h、旋耕转速为 350 r/min、旋耕深度为 180 mm、深松深度为 380 mm。利用田间综合测试车取作业稳定区连续的 100 次计数点,测量机具牵引阻力^[34]。两种机具性能指标和试验方法依据 JB/T 10295—2014《深松整地联合作业机》,试验指标有:旋耕深度、旋耕深度稳定性、深松深度、深松深度稳定性、植被覆盖率、土壤膨松度、地表平整度。

4.3 试验结果与分析

反旋深松联合作业耕整机试验现场如图 10 所示。各性能指标均为行程结果的平均值,反旋深松联合作业耕整机与深松旋耕联合整地机作业性能试验结果如表 3 所示。两种机具牵引阻力如图 11 所示。

反旋深松联合作业耕整机试验结果与行业标准对比表明:反旋深松联合作业耕整机旋耕深度、深松深度、地表平整度、土壤膨松度分别为 182.8 mm、



图 10 田间试验

Fig. 10 Photo of field test

表 3 性能试验结果

Tab. 3 Results of performance experiment

性能参数	反旋深松机 试验结果	深松旋耕机 试验结果	行业标准
旋耕深度/mm	182.8	188.0	≥80
旋耕深度稳定性/%	92.11	86.72	≥85
深松深度/mm	388.4	325.4	≥250
深松深度稳定性/%	96.09	87.11	≥80
植被覆盖率/%	97.25	84.48	≥60
土壤膨松度/%	17.22	16.56	10 ~ 40
地表平整度/mm	18.3	17.7	≤40

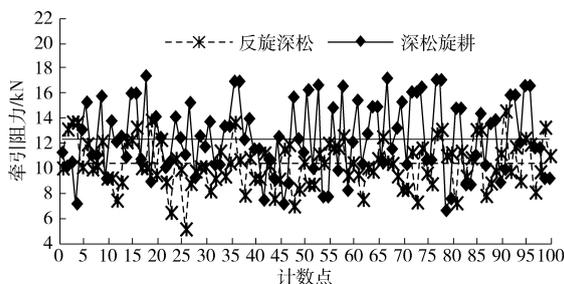


图 11 牵引阻力测量对比

Fig. 11 Comparison of drag force measurement

388.4 mm、18.3 mm、17.22%；旋耕深度稳定性、深松深度稳定性、植被覆盖率均在 90% 以上。均满足 JB/T 10295—2014《深松整地联合作业机》评定指标。说明反旋深松联合作业耕整机一次作业能够实现深层土壤疏松、表层土壤破碎平整、混合秸秆的目的,使土壤达到待播状态。

反旋深松联合作业耕整机试验结果与深松旋耕联合整地机对比表明:与深松旋耕联合整地机相比,反旋深松联合作业耕整机作业提高了 6.22% 的旋耕深度稳定性与 10.3% 的深松深度稳定性,表明基于交互作业的深松部件与旋耕部件设计提高了联合作业耕整机耕深稳定性;反旋深松联合作业耕整机植被覆盖率 97.25%,比深松旋耕联合整地机提高了 15.12%,与离散元仿真较优组合的植被覆盖率 98.37% 基本一致,因此得出:反转旋耕比正转旋耕提高了植被覆盖率;离散元仿真的准确性和可行性;反旋深松联合作业耕整机土壤膨松度、地表平整度与深松旋耕联合整地机基本相同。综合分析可知,

反旋深松联合作业耕整机比深松旋耕联合整地机提高了耕作稳定性和植被覆盖率,且不会影响其他作业指标。

由图 11 两种机具牵引阻力田间测量结果可得:旋耕深度为 180 mm、深松深度为 380 mm 时,反旋深松联合作业耕整机牵引阻力 10.32 kN 比深松旋耕联合整地机牵引阻力 12.31 kN 平均降低了 16.21%。在深松旋耕联合整地机作业过程中前部的深松铲缠绕大量秸秆根茬,且出现拖拉机打滑现象,造成多次停机,严重影响其作业质量;而反旋深松联合作业耕整机作业过程较为稳定,并未出现秸秆缠绕和打滑现象。由此表明:深层耕作时,反旋深松联合作业耕整机有较好的减阻、防缠效果;离散元优化参数的准确性。

5 结论

(1)以加深耕作深度、提高作业质量、减少作业功耗为目标,设计一种反旋深松联合作业耕整机。一次作业完成深松、旋耕、镇压等工序,从而实现深层土壤疏松、表层土壤破碎平整、秸秆混埋的目的。其中基于部件作业过程中的交互作用,设计旋耕部

件置于深松铲柄弯弧斜上方,以降低阻力和减少秸秆缠绕;确定整机重心为位于旋耕与深松间,以增加耕深稳定性;确定旋耕部件为反转旋耕,提高整机作业质量;设计翼铲长度为 125 mm、两翼铲间作业宽度为 350 mm,以使旋耕深度较浅时能够实现潜土作业。

(2)利用 EDEM 软件对反旋深松联合作业耕整机进行虚拟仿真分析,通过三因素三水平正交试验,优化仿真分析得出:作业速度 v_m 为 1.8 km/h、刀轴转速 n 为 350 r/min、旋耕刀类型 X 为 IIT195 弯刀为较优参数组合,此时,机具作业壅土量为 5 283 个土壤颗粒,植被覆盖率为 98.37%。并基于离散元仿真过程中深松铲单体牵引阻力变化,对深松铲进行静力学有限元分析,得出深松铲强度满足作业要求。

(3)田间试验结果表明,反旋深松联合作业耕整机旋耕深度、深松深度、地表平整度、土壤膨松度分别为 182.8 mm、388.4 mm、18.3 mm、17.22%;旋耕深度稳定性、深松深度稳定性、植被覆盖率均在 90% 以上,均满足相关标准性能评定指标。与深松旋耕联合整地机相比,反旋深松联合作业耕整机不影响作业效果前提下,提高了耕深稳定性、植被覆盖率,同时使牵引阻力降低了 16.21%。

参 考 文 献

- 1 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2005.
- 2 郑侃,何进,王庆杰,等. 联合整地作业机具的研究现状[J]. 农机化研究,2016,38(1): 257-263.
ZHENG Kan, HE Jin, WANG Qingjie, et al. The current research status of combined tillage machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 257-263. (in Chinese)
- 3 TAO Zhiqiang, SUI Peng, CHEN Yuanquan, et al. Subsoiling and ridge tillage alleviate the high temperature stress in spring maize in the North China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(12): 2179-2188.
- 4 HU Hengyu, NING Tanguan, LI Zengjia, et al. Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen water use and yield of different varieties of maize in Northern China[J]. Field Crops Research, 2013, 142(3): 85-94.
- 5 RAPER R L, REEVES D W, SHAW J N, et al. Benefits of site specific subsoiling for cotton production in coastal plain soils[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1): 174-181.
- 6 AMARDEEP S K, GURMEET S C, SHISLI S. Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blader[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 1442-1451.
- 7 夏俊芳,许绮川,周勇. 旋耕技术的研究现状和发展趋势[J]. 华中农业大学学报,2005,24(增刊1): 83-85.
XIA Junfang, XU Qichuan, ZHOU Yong. Status and research prospects for the technology of rotary tillage[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005,24(Supp.1): 83-85. (in Chinese)
- 8 赵伟,周志立,牛毅,等. 深松与旋耕组合作业机具的开发[J]. 农业机械学报,2007,38(2): 79-82.
ZHAO Wei, ZHOU Zhili, NIU Yi, et al. Development of subsoiling and rotary tilling unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(2): 79-82. (in Chinese)
- 9 赵大勇,李连豪,许春林,等. 1ZQHF-350/5型前后分置悬挂式联合整地机[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10): 92-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141015&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.015.
ZHAO Dayong, LI Lianhao, XU Chunlin, et al. 1ZQHF-350/5 hang combined cultivating machine with front-stubble-breaking post-subsoil and rotary-tilling equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 92-96. (in Chinese)
- 10 张欣悦,李连豪,汪春,等. 1GSZ-350型灭茬旋耕联合整地机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2009,25(5): 73-77.
ZHANG Xinyue, LI Lianhao, WANG Chun, et al. Design and test of 1GSZ-350 stubble-breaking and rotary tilling combined cultivating machine [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 73-77. (in Chinese)
- 11 秦宽,丁为民,方志超,等. 犁翻旋耕复试作业耕整机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(16): 7-16.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage combined machine [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 7-16. (in Chinese)
- 12 农业部农业机械化管理局. 中国保护性耕作[M]. 北京:中国农业出版社,2008.
- 13 银广,牛吉朋,巴青城,等. 深松、旋耕单独作业与深松旋耕联合整地机作业对比分析[J]. 南方农业,2015,9(18): 169-170.
- 14 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 15 丁为民,王耀华,彭高植. 正、反转旋耕刀性能分析及切土扭矩比较试验[J]. 南京农业大学学报,2001,24(1): 113-117.

- DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi. Comparison experiment and property analysis of up cut and down cut rotary blades[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001, 24(1): 113 - 117. (in Chinese)
- 16 陈青春,石勇,丁启朔,等. 正反旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. 农业工程学报,2015,31(9): 13 - 18.
CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13 - 18. (in Chinese)
- 17 桑正中,王长兵. 潜土逆转耕研究展望[J]. 农业工程学报,1994,10(3): 88 - 92.
- 18 丁为民,王耀华,彭高植. 正、反旋耕不同耕作性能的比较[J]. 南京农业大学学报,2003,26(3): 106 - 109.
DING Weimin, WANG Yaohua, PENG Songzhi. Comparison on performances of up cut and down cut rotary tillage[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2003, 26(3): 106 - 109. (in Chinese)
- 19 SHIBUSAWA S. Reverse rotational rotary tiller for reduced power requirement in deep tillage[J]. Journal of Terramechanics, 1993, 30(3): 205 - 217.
- 20 郑厚贵,张周强,徐武彬,等. 基于土壤压缩破坏理论的挖掘铲的设计与分析[J]. 农机化研究,2011,33(11): 122 - 126.
ZHENG Hougui, ZHANG Zhouqiang, XU Wubin, et al. Based on soil compression and failure theory of digging shovel design and analysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(11): 122 - 126. (in Chinese)
- 21 石彦琴,高旺盛,陈源泉,等. 耕层厚度对华北高产灌溉农田土壤有机碳储量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(11):85 - 90.
- 22 李铁冰,逢焕成,杨雪,等. 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响[J]. 生态学报,2013,33(23):7478 - 7486.
LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang - Huai - Hai Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7478 - 7486. (in Chinese)
- 23 李洪文,高焕文,王兴文. 可调翼铲式深松机的试验研究[J]. 北京农业工程大学学报,1995,15(2): 33 - 39.
LI Hongwen, GAO Huanwen, WANG Xingwen. Experimental study on subsoiler with adjustable wing[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1995, 15(2): 33 - 39. (in Chinese)
- 24 李霞. 振动深松减阻机理及试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2013.
LI Xia. Study on mechanism of traction reduction and experiment vibrating subsoiling[D]. Beijing:China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 25 李洪文,陈君达,李问盈. 保护性耕作条件下深松技术研究[J]. 农业机械学报,2000,31(6): 42 - 45.
LI Hongwen, CHEN Junda, LI Wenying. Study on subsoiling technique for conservation tillage field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6): 42 - 45. (in Chinese)
- 26 周玉乾. 深松铲受力数学模型与计算机模拟[D]. 郑州:河南农业大学,2006.
ZHOU Yuqian. Force mathematical model and computer simulation of the subsoiler [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 27 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:北京科学技术出版社,1990.
- 28 冯俊小,林佳,李十中,等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3): 208 - 213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150330&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.030.
- FENG Junxiao, LIN Jia, LI Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 208 - 213. (in Chinese)
- 29 方会敏,姬长英,AHMED Ali Tagar,等. 秸秆土壤旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1): 60 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.
- FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw soil rotary blade system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60 - 67. (in Chinese)
- 30 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/OL]. 农业机械学报,2016,47(9): 62 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010.
- ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62 - 72. (in Chinese)
- 31 李伯全,陈翠英,梁君秋. 潜土逆转旋耕理论模型验证及工作参数选择[J]. 江苏大学学报,2005,26(3): 203 - 205.
LI Boquan, CHEN Cuiying, LIANG Junqiu. Proof of theoretic model for latent soil of up cut rotary cultivation and optimization of working parameters[J]. Journal of Jiangsu University, 2005, 26(3): 203 - 205. (in Chinese)
- 32 郭俊,姬长英,方会敏,等. 正反旋耕后土壤和秸秆位移试验分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5): 21 - 26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160504&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.004.
- GUO Jun, JI Changying, FANG Huimin, et al. Experimental analysis of soil and straw displacement after up cut and down cut rotary tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 21 - 26. (in Chinese)
- 33 王金武,王奇,唐汉,等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9): 112 - 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016.
- WANG, Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112 - 117. (in Chinese)
- 34 乔晓东,王晓燕,颜华,等. 后悬挂农具田间试验平台[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8): 63 - 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130811&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.011.
- QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyan, YAN Hua, et al. Field experiment platform for rear suspension[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 63 - 68. (in Chinese)