

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.004

# 伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机设计与试验

杨庆璐<sup>1,2</sup> 陈桂斌<sup>1,2</sup> 谢立娟<sup>1,2</sup> 王庆杰<sup>1,2</sup> 何进<sup>1,2</sup> 李洪文<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测实验站, 北京 100083)

**摘要:** 针对黄淮海小麦、玉米两熟区玉米秸秆全量还田后, 现有旋耕整地作业存在表层土壤土秆混合秸秆量大、影响后续小麦播种质量的问题, 设计了一种伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机。通过偏心伸缩指杆组先接触秸秆, 并低速近抛秸秆, 旋耕刀后接触已被清理秸秆的土壤, 并高速远抛土壤覆盖秸秆, 实现“秆下土上”分离掩埋。对秸秆旋耕掩埋机的旋耕刀、伸缩指杆进行运动分析, 确定了旋耕刀和伸缩指杆速度的关系, 完成了偏心伸缩指杆组、栅栏、压杆齿等关键部件的结构和参数设计, 并运用多体动力学 RecurDyn 软件对旋耕刀、伸缩指杆和压杆齿端点的运动轨迹进行追踪, 分析了三者端点速度和角速度的变化规律, 仿真结果表明速度和角速度变化规律与理论分析一致。对秸秆旋耕掩埋机和普通旋耕机进行了田间对比试验, 测定地表 50 mm 以下的秸秆掩埋率, 结果表明: 秸秆旋耕掩埋机的秸秆掩埋率为 83.25%, 比普通旋耕机提高了 10.05 个百分点。

**关键词:** 保护性耕作; 秸秆还田; 秸秆掩埋机; 旋耕; 伸缩指杆式

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0035-09

OSID:



## Design and Experiment of Telescopic Finger Stalk of Maize Straw Burying Machine

YANG Qinglu<sup>1,2</sup> CHEN Guibin<sup>1,2</sup> XIE Lijuan<sup>1,2</sup> WANG Qingjie<sup>1,2</sup> HE Jin<sup>1,2</sup> LI Hongwen<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Cultivated Land Conservation Agricultural Science Observation and Experiment Station, Northern Hebei Province, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of large surface straw coverage after mechanical harvesting of corn and returning straw to the field and surface soil mixed with straw after rotary tillage and the impact on subsequent seeding quality, combining the planting patterns and agronomic requirements of the wheat and maize for double cropping area in Huang-Huai-Hai region, a telescopic finger stalk burying device was designed based on commonly used rotary tillers. The device was mainly composed of a rotary tiller roller, a fence and a stalk tooth equipped with an eccentric telescopic finger set. The eccentric telescopic finger group first contacted the straw and then threw the straw close at a low speed. After the rotary cutter touched the soil that was cleared of the straw and threw the soil far at high speed and covered the straw, then the separate burial “the straw was under the soil” was achieved. The theoretical analysis of the motion of rotary tiller and telescopic finger in the straw burial device determined the relationship between the speed of the rotary tiller. Besides, the telescopic finger and the structure and parameter design of key components such as the eccentric telescopic finger group, the fence and the stalk teeth were completed. By using the multi-body dynamics RecurDyn software to track the motion trajectories of the end points of rotary cultivator, telescopic finger and pressing stalk teeth and analyze the speed and angular velocity motion rules of the three end points, it was found that the motion laws were consistent with the theoretical analysis. Field comparison tests were performed on the straw burial device and the conventional rotary cultivating device, and the straw burial rate of the surface below 50 mm was measured. The results showed that the burial rate of the straw burial device was 83.25%, which was 10.05 percentage points higher than that of the conventional rotary cultivating device.

**Key words:** maize conservation tillage; returning straw to field; straw burying machine; rotary tillage; telescopic finger stalk

收稿日期: 2020-02-28 修回日期: 2020-04-17

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201503136)

作者简介: 杨庆璐(1990—),男,博士生,主要从事保护性耕作技术与装备研究, E-mail: yangqinglu0908@163.com

通信作者: 王庆杰(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究, E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

## 0 引言

作物秸秆还田可以增加土壤有机质、改善土壤结构、促进土壤中微生物活性、提高土壤肥力,同时可有效减少农田秸秆焚烧,是一项环境友好型农业技术<sup>[1-7]</sup>。

我国黄淮海小麦、玉米两熟区的玉米秸秆还田主要有两种处理方式:在秸秆覆盖条件下直接进行少免耕播种;作物秸秆还田后,采用旋耕或翻耕的方式进行土地耕整<sup>[8]</sup>。其中,旋耕整地最为常见,具有操作方便、碎土能力强、地面平整等优点<sup>[9-11]</sup>,能够实现秸秆与土壤混埋,但对残茬、杂草的覆盖能力较差<sup>[12]</sup>。当地表秸秆还田量较大时,现有旋耕机不能有效掩埋秸秆,导致表层土壤(0~5 cm)混有大量碎秆,播种时易将种子播到秸秆上,出现晾种<sup>[13-17]</sup>,进而导致弱苗、缺苗现象。目前,应用较广泛的秸秆掩埋方式有秸秆混埋和秸秆深埋。秸秆混埋通过旋耕机、圆盘耙等将长秸秆切断<sup>[18]</sup>,同时将土壤与秸秆混合;秸秆深埋主要通过铧式犁将秸秆翻入土壤深处。国内学者针对秸秆混埋表层土壤中的土秆混合问题,开展了大量有关秸秆深埋机具的研究,而对秸秆混埋机具的研究较少。郑智旗等<sup>[19]</sup>设计了秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机,将秸秆进行开沟深埋;田家治等<sup>[20]</sup>设计了秸秆掩埋翻耕犁,可将秸秆和根茬全部掩埋。秸秆深埋虽能降低表层土壤的秸秆数量,但存在动力消耗大、后续仍需耕整地等问题。

本文提出一种秸秆近抛下压、土壤远抛覆盖的土秆分离方法,实现“秆下土上”秸秆掩埋,设计相应伸缩指杆式秸秆分离掩埋装置,优化机构参数,并通过田间试验对机具性能加以验证。

## 1 结构与原理

秸秆掩埋机主要由支架、带孔的旋耕刀辊、偏心轴、伸缩指杆组、旋耕刀、栅栏、压秆齿、镇压轮、挡土板等组成,如图1所示。

旋耕刀辊通过压盖和轴承室安装到秸秆掩埋机侧边挡土板上,旋耕刀辊内部装有偏心轴,偏心轴靠近侧边挡土板的端部为方轴,压盖上带有方形孔,偏心轴通过插接到压盖方形孔上实现偏心轴的固定。作业时,拖拉机的动力经变速箱带动旋耕刀辊转动,穿过旋耕刀辊孔的伸缩指杆组随着旋耕刀辊做圆周运动,同时由于偏心轴固定,伸缩指杆组沿着孔做伸缩运动,伸缩指杆末端为扭簧,每把刀对应一个伸缩指杆,伸缩指杆先于刀片接触未耕地表,由于地表的反作用力,扭簧发生变形,沿地表向后滑动将秸秆拖

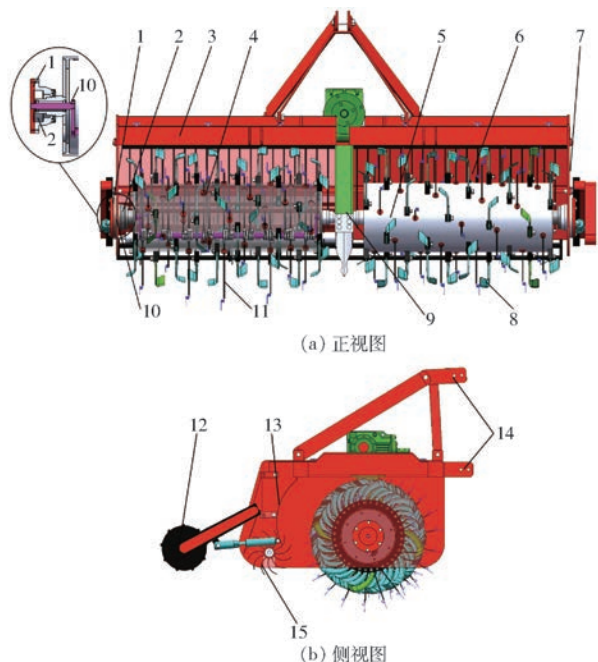


图1 秸秆掩埋机结构简图

Fig. 1 Structural diagrams of straw burying machine

1. 压盖 2. 轴承室 3. 支架 4. 密封组件 5. 带孔的旋耕刀辊
6. 侧边挡土板 7. 挡土板 8. 旋耕刀 9. 变速箱 10. 偏心轴
11. 伸缩指杆 12. 镇压轮 13. 栅栏 14. 悬挂装置 15. 压秆齿

至上一把刀切开的土壤中,下一把刀接触伸缩指杆清理的地表进行切土碎土作业,并将土和部分秸秆抛至右后上方,在栅栏的拦截作用下,大部分秸秆改变原有运动轨迹返回地表,而土壤穿过栅栏继续向右后上方运动,直到撞击到机具的挡土板上才返回地表落在秸秆上方覆盖秸秆,之后压秆齿在镇压轮的驱动下做滚摆线运动,将地表残余秸秆压入土壤而不带出地表,至此整个秸秆分离掩埋过程结束。

## 2 关键部件设计

### 2.1 运动理论分析

机具正常作业向后抛土,此时机具刀片端点的运动轨迹为余摆线。当机具前进速度  $v_m = 0$  时,如图2所示,刀片端点  $M$  处的速度沿圆周的切线方向,计算式为

$$v_{iM} = \omega R \quad (1)$$

式中  $v_{iM}$ ——刀片端点  $M$  速度, m/s

$\omega$ ——带孔旋耕刀辊角速度, rad/s

$R$ ——点  $M$  到圆心  $O$  距离(回转半径), mm

速度分解公式为

$$\begin{cases} v_{x1} = v_m + v_{iM} \sin\theta \\ v_{y1} = v_{iM} \cos\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中  $v_{x1}$ ——点  $M$  水平方向速度, m/s

$v_{y1}$ ——点  $M$  竖直方向速度, m/s

$\theta$ —— $OM$  与  $x$  轴负半轴的夹角, ( $^\circ$ )

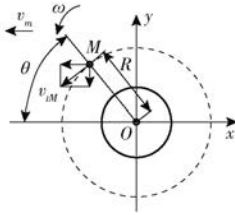


图 2 刀片端点速度分解示意图

Fig. 2 Blade end speed decomposition

扭簧端点运动是机具前进运动、刀辊旋转运动产生的切向分运动和沿指杆的伸缩运动的合成运动。当  $v_m = 0$  时,扭簧端点运动轨迹如图 3 所示。刀辊中心为  $O$ ,偏心轴轴心  $O'$  位于旋耕刀辊内部左前方,经过  $OO'$  两点的直线  $L$  与水平方向夹角为  $\alpha$ ,偏心轴轴心与旋耕刀辊中心之间的距离(偏心距)即  $OO'$  为  $d$ ,伸缩指杆为  $O'Q$ ,点  $Q$  为扭簧任意端点位置,直线  $L$  与点  $Q$  的轨迹交于  $A$ 、 $B$  两点,点  $P$  为旋耕刀辊上任意位置, $OP$  与水平方向夹角为  $\beta$ , $O'P$  与水平方向夹角为  $\gamma$ 。

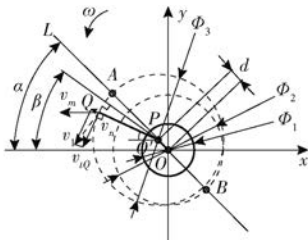


图 3 扭簧端点运动轨迹

Fig. 3 Torsion spring end trajectory

当扭簧端点位于点  $Q$  时,带孔的旋耕刀辊在角速度  $\omega$  的转动下在点  $P$  处产生一个方向垂直于直线  $OP$  的速度  $v_{ip}$ ,有

$$v_{ip} = \frac{\omega \Phi_1}{2} \quad (3)$$

式中  $\Phi_1$ ——旋耕刀辊直径,mm

如图 4 所示,点  $P$  处的速度  $v_{ip}$  分解为垂直于伸缩指杆  $O'P$  的切向速度  $v_t$  和沿径向的  $v_n$ ,由三角函数计算得出

$$\begin{cases} v_t = v_{ip} \cos(\beta - \gamma) \\ v_n = v_{ip} \sin(\beta - \gamma) \end{cases} \quad (4)$$

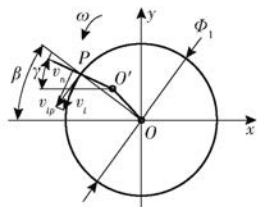


图 4 点  $P$  速度分解示意图

Fig. 4  $P$  point velocity decomposition

由圆周运动速度与角速度公式得出围绕圆心  $O'$  的圆周角速度  $\omega_1$  公式为

$$\omega_1 = \frac{v_t}{x} \quad (5)$$

式中  $x$ ——点  $O'$  到点  $P$  的距离,mm

因为  $x$  在旋耕刀辊内部,故  $x$  的范围为  $[\Phi_1/2 - d, \Phi_1/2 + d]$ 。

如图 3 所示,扭簧端点  $Q$  的切向速度  $v_{tQ}$  为

$$v_{tQ} = \frac{\omega_1 \Phi_3}{2} \quad (6)$$

式中  $\Phi_3$ ——扭簧端点圆周运动轨迹直径,mm

扭簧端点  $Q$  任意位置速度方程式为

$$\begin{cases} v_x = v_m + v_{tQ} \sin \gamma - v_n \cos \gamma \\ v_y = v_{tQ} \cos \gamma + v_n \sin \gamma \end{cases} \quad (7)$$

式中  $v_x$ ——点  $Q$  水平方向速度,m/s

$v_y$ ——点  $Q$  竖直方向速度,m/s

直线  $L$  为过刀辊中心  $O$  和偏心轴中线  $O'$  的直线,当扭簧与直线  $L$  共线时, $\alpha = \beta = \gamma$ 。代入式(3)~(6)计算得

$$\begin{cases} v_t = v_{ip} \\ v_n = 0 \\ \omega_1 = \frac{\omega \Phi_1}{2x} \\ v_{tQ} = \frac{\omega \Phi_1 \Phi_3}{4x} \end{cases} \quad (8)$$

将计算结果代入式(7)得出扭簧端点在点  $A$  和点  $B$  处的速度分别为

$$\begin{cases} v_{xA} = v_m + \frac{\omega \Phi_1 \Phi_3}{2\Phi_1 - 4d} \sin \alpha \\ v_{yA} = \frac{\omega \Phi_1 \Phi_3}{2\Phi_1 - 4d} \cos \alpha \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} v_{xB} = v_m + \frac{\omega \Phi_1 \Phi_3}{2\Phi_1 + 4d} \sin \alpha \\ v_{yB} = \frac{\omega \Phi_1 \Phi_3}{2\Phi_1 + 4d} \cos \alpha \end{cases} \quad (10)$$

因此,扭簧位于直线  $L$  上点  $A$  时,扭簧端点出现速度最大值  $v_{max}$ ,位于点  $B$  时,出现速度最小值  $v_{min}$ ,因此直线  $L$  为速度和角速度分界线,当扭簧在逆时针转动过程中由点  $A$  至点  $B$  再到点  $A$  时,其速度和角速度由大变再变大。经计算比较式(2)、(9)、(10)中旋耕刀片速度和扭簧端点速度最大值和最小值发现,旋耕刀片速度大于扭簧速度最小值,小于扭簧速度最大值。

在点  $B$  的土秆分离原理如图 5 所示,通过偏心伸缩指杆组旋耕刀入土时间顺序、入土深度及端点速度等不同来实现秸秆先被清理后近抛,旋耕刀后入土实现远抛土壤覆盖秸秆,从而实现“秆下土上”分离掩埋。

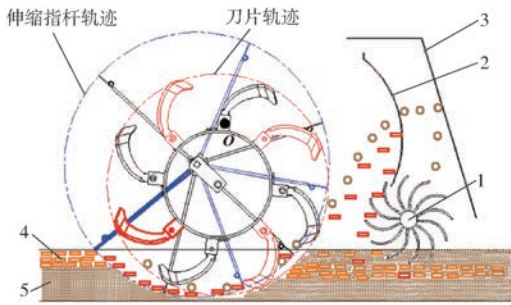


图5 土杆分离原理图

Fig.5 Schematic of soil and rod separation

1. 压秆齿 2. 栅栏 3. 挡土板 4. 秸秆 5. 土壤

## 2.2 偏心伸縮指杆组

偏心伸縮指杆组设计主要包括伸縮指杆结构设计以及偏心轴位置和伸縮指杆长度的确定。

伸縮指杆组主要作用是拨秸秆,将秸秆拖至旋耕低洼处。因此要求其具有根部硬、端部韧的结构特点。设计的伸縮指杆由弹簧钢、扭簧、焊套和轴承组成,伸縮指杆分为直指杆和弯指杆,如图6所示,两者选用不同焊套。直指杆和弯指杆配合使用,其夹角为 $180^\circ$ 。

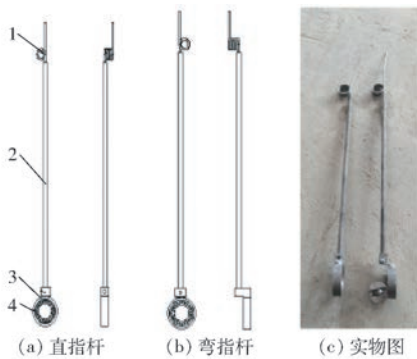


图6 伸縮指杆

Fig.6 Telescopic finger

1. 扭簧 2. 弹簧钢 3. 焊套 4. 轴承

偏心轴位于带孔的旋耕刀辊内部,因此偏心距与刀辊直径有关。综合考虑成本、重量、结构强度等因素,调研市场上现有的产品后,选择外径为 $377\text{ mm}$ 、壁厚为 $8\text{ mm}$ 、长度为 $1\ 030\text{ mm}$ 、材质为Q235的钢管作为旋耕刀辊,所以 $\Phi_1$ 为 $377\text{ mm}$ 。偏心距越大,伸縮指杆拨秸秆的作业范围越大,但伸縮指杆通过轴承和轴承套等安装于偏心轴上,因此偏心距不宜过大,本文偏心距 $d$ 取为 $110\text{ mm}$ 。由于秸秆还田后地表秸秆覆盖量大,根茬多,参考GB/T 5569—2008《旋耕机械刀和刀座》,选择用于旱田作业的旋耕刀片,本文选用HT245旋耕弯刀,作业宽度 $b$ 为 $50\text{ mm}$ ,因此 $\Phi_2$ 为 $775\text{ mm}$ , $R$ 为 $387.5\text{ mm}$ 。

端部的扭簧向后方拨动未旋耕区域的秸秆,而同一纵平面相邻刀片旋耕扭簧已作业区域,因此最佳极限位置是旋耕刀末端刚刚接触地表,如图7所

示。旋耕机耕深一般为 $120\sim 160\text{ mm}$ ,本文耕深 $H_2$ 取 $150\text{ mm}$ 。

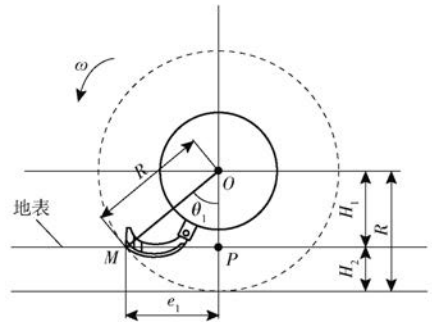


图7 刀片端点接触地表示意图

Fig.7 Blade end touched surface

本文中秸秆旋耕掩埋作业后直接播种,对碎土质量要求较高,因此切土节距 $S$ 为 $60\sim 90\text{ mm}$ 较为适合<sup>[21]</sup>。扭簧端点正好接触地表(忽略秸秆的厚度),要求两者之间的距离 $e \geq S$ ,取 $S = 60\text{ mm}$ ,即 $e \geq 60\text{ mm}$ 。由于未旋耕地表较硬,避免出现扭簧受力变形影响其伸縮性能,扭簧端点在水平方向的最低点越高越好。如图8所示,当 $OO'$ 位于水平线上时,此极限位置出现扭簧长度最短和 $\alpha_1$ 最小。

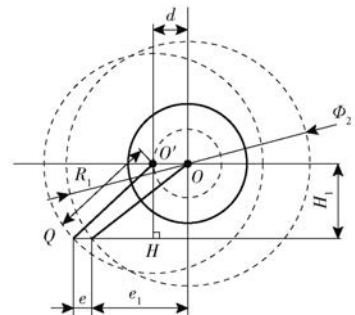


图8 扭簧最小极限位置示意图

Fig.8 Torsion spring minimum limit position

在图8所示直角 $\triangle O'QH$ 中,由勾股定理得

$$R_1^2 = H_1^2 + (e + e_1 - d)^2$$

$$\text{即 } R_1^2 \geq (R - H_1)^2 + (e + \sqrt{R^2 - H_1^2} - d)^2 \quad (11)$$

式中  $e$ ——扭簧端点与刀片端点的距离,mm

$e_1$ ——圆心 $O$ 与刀片端点的水平距离,mm

$R_1$ ——伸縮指杆长度,mm

$H_1$ ——旋耕刀轴中心到地表距离,mm

计算得 $R_1 \geq 349.202\text{ mm}$ , $R_1$ 最小值取整为 $350\text{ mm}$ , $\alpha_1$ 最小值为 $0$ 。由式(11)发现扭簧最短长度与回转半径 $R$ 、旋耕刀轴中心到地表距离 $H_1$ 、偏心距 $d$ 有关,而回转半径 $R$ 与旋耕刀辊直径 $\Phi_1$ 、旋耕刀类型有关,偏心距 $d$ 的确定主要与旋耕刀辊直径 $\Phi_1$ 有关。

扭簧端点运动至最底部时,受到地面的反作用力最大,由于其弹性的特点,其最低点位置应该高于或等于旋耕刀片端点最低端,避免其受力过大而弯

曲。当扭簧最低点和旋耕刀最低点在同一水平面条件下,如图9所示,得到方程

$$R_1 = R + d \sin \alpha_1 \quad (12)$$

式中  $\alpha_1$ —— $OO'$ 与机具前进方向上的夹角, ( $^\circ$ )

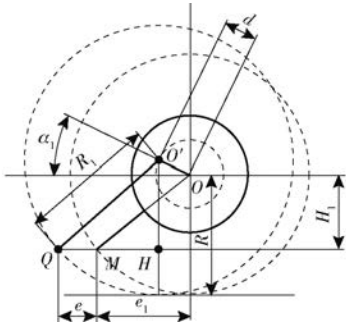


图9 切土节距最大极限位置示意图

Fig.9  $\lambda$  maximum limit position

在直角 $\triangle O'QH$ 中,由勾股定理得

$$R_1^2 = (e + e_1 - d \cos \alpha_1)^2 + (H_1 + d \sin \alpha_1)^2$$

整理得

$$e = \sqrt{(R + d \sin \alpha_1)^2 - (H_1 + d \sin \alpha_1)^2} + d \cos \alpha_1 - e_1 \quad (13)$$

$$e' = \frac{2(R - H_1) d \cos \alpha_1}{2 \sqrt{(R + d \sin \alpha_1)^2 - (H_1 + d \sin \alpha_1)^2}} - d \sin \alpha_1 = 0 \quad (14)$$

式中  $e'$ —— $e$ 的一阶导数

当 $e' = 0$ 时, $e$ 存在最值。计算得出 $\alpha_1$ 为 $24.453^\circ$ 或 $155.414^\circ$ 。因为 $\alpha_1 < 90^\circ$ ,所以 $\alpha_1$ 为 $24.453^\circ$ 。由式(12)计算得 $R_1 = 433$  mm,由式(13)计算得 $e_{\max} \approx 121.828$  mm。因为切土节距合理范围为 $60 \sim 90$  mm,因此令 $e = 90$  mm,代入公式(13)中解得 $\alpha_1 = 66.38^\circ$ ,此时 $R_1 = 488.29$  mm。

综上所述,偏心轴与水平方向的夹角 $\alpha_1$ 的范围为 $24.453^\circ \sim 66.38^\circ$ ,伸缩指杆长度 $R_1$ 的范围为 $433.00 \sim 488.29$  mm,为了有效利用伸缩指杆,缩短其长度,在满足切土要求,尽量减少其受力情况,减少其入土深度,本文设伸缩指杆长度 $R_1 = 455$  mm,取 $e = 100$  mm,解得 $\alpha_1 = 44.8^\circ$ ,取整为 $45^\circ$ 。

### 2.3 刀片排列

近年来,我国旋耕机具向着大幅宽方向发展,多采用中间传动形式,旋耕刀片分别安装在左右刀辊上<sup>[22]</sup>。旋耕刀片在刀辊上的排列是影响耕作质量及功率消耗的重要因素之一。

旋耕速比和切土节距是评价旋耕机作业性能和碎土质量的主要指标。旋耕速比 $\lambda$ 为

$$\lambda = \frac{R_2 \omega_2}{v_m} \quad (15)$$

式中  $R_2$ ——刀片回转半径,mm

$\omega_2$ ——刀辊旋转角速度,rad/s

切土节距为

$$S = \frac{6000 v_m}{nz} = \frac{\pi R}{5 \lambda z} \quad (16)$$

式中  $n$ ——刀辊转速,r/min

$z$ ——旋耕刀数量,把

$z$ 的取值为整数,同一纵平面安装的旋耕刀数量一般为 $z \geq 2$ ,由于 $\lambda > 1$ ,所以当 $z = 2$ 时, $S < 121.675$  mm,当 $z = 3$ 时, $S < 81.116$  mm,当 $z = 4$ 时, $S < 60.837$  mm。旋耕刀数量增加,切土节距越小,作业质量越好,因此选择 $z = 4$ 。4把刀片均匀安装,即相邻刀片间隔 $90^\circ$ 。

如图10所示,刀座的宽度为 $Y$ ,根据GB/T 5669—1995,用于四轮拖拉机的刀座 $Y = 21$  mm,由于弯刀在切土的过程中可以将周围的土撕裂,因此刀座间距 $b'$ 可以大于弯刀工作幅宽 $b$ <sup>[23]</sup>。

$$b' = b + \Delta b \quad (17)$$

式中  $\Delta b$ ——刀座间距调整范围,mm

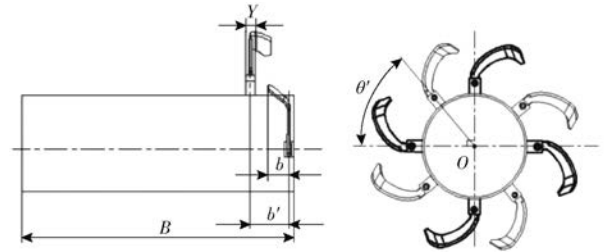


图10 刀片排列

Fig.10 Blade arrangement

$\Delta b$ 常用范围为 $15 \sim 20$  mm<sup>[23]</sup>,考虑到左右相邻两把刀之间放置伸缩指杆,为避免两者产生干涉,加大 $\Delta b$ 取值,为避免产生漏耕, $\Delta b$ 取 $45$  mm。

旋耕刀片总数计算式为

$$z' = \frac{Bz}{b'} \quad (18)$$

式中  $z'$ ——弯刀总数(取4的倍数),把

$B$ ——幅宽,mm

幅宽为 $1030$  mm,代入数据解得 $z' = 43$ , $z'$ 是4的倍数,因此取 $z' = 40$ ,左右弯刀各 $20$ 把。

轴向相邻两把刀片的最小夹角一般为 $54^\circ < \theta' < 85^\circ$ <sup>[23]</sup>,因此取 $\theta' = 55^\circ$ 。

### 2.4 栅栏

栅栏的主要作用是将部分被伸缩指杆和旋耕刀抛起的秸秆和土壤分离。工作时,栅栏将大部分秸秆挡住,改变了其原有的运动轨迹,使其返回至地表,而土壤继续运动穿过栅栏撞击到机具挡土板上后返回地表覆盖到秸秆上,如图11所示,栅栏和压秆齿的齿在空间有交错关系,不会产生干涉现象。玉米等作物秸秆还田后,秸秆粉碎合格长度小于等

于 100 mm<sup>[23]</sup>,经测量发现秸秆长度大部分在 40 ~ 60 mm 之间<sup>[24]</sup>,为防止栅栏间距过小发生堵塞现象,本文栅栏间距为 50 mm。栅栏采用弧度设计有利于秸秆缓慢沿弧线滑下,设计栅栏半径为  $R_3 = 350$  mm,长度  $H_6 = 400$  mm,材料为弹簧钢,直径为 6 mm。秸秆沿栅栏滑下,避免在地面产生拥堵现象,本文设计栅栏宽度  $e_2 = 200$  mm。

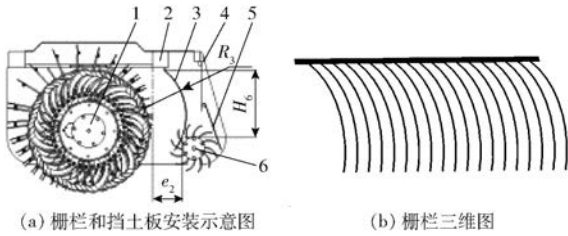


图 11 栅栏和挡土板

Fig. 11 Fences and Fenders

1. 秸秆掩埋刀轴 2. 横梁 3. 栅栏 4. 固定挡土板 5. 活动挡土板 6. 压秆齿

## 2.5 压秆齿

压秆齿的主要作用是将地表残余秸秆进一步压入土壤,减少表层土壤中的秸秆,清洁种带。工作时,压秆齿由镇压轮转动提供动力,通过两级链轮传动,使得运动方向与镇压轮、旋耕刀辊一致,在弧形弯齿的旋转按压作用下将秸秆按入一定深度。为使得弯齿在离开时不将秸秆带出地面,如图 12 所示,设计旋耕速比  $\lambda = 1$ 。在一年两熟区玉米收获后一般种植小麦,小麦最适宜的播种深度为 20 ~ 40 mm<sup>[23]</sup>,因此本文设计压秆齿压入土壤深度为  $H_7 = 50$  mm,弯齿回转直径  $\Phi_4 = 300$  mm。

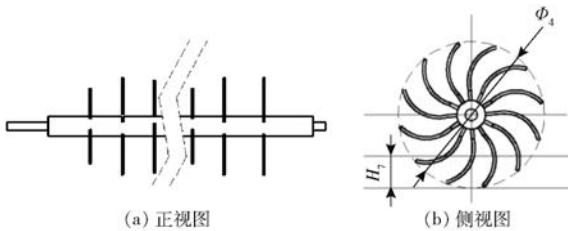


图 12 压秆齿结构示意图

Fig. 12 Structure diagrams of press stalk tooth

## 3 运动学仿真分析

运用多体动力学对秸秆旋耕掩埋机关键部件运动情况进行进一步分析。通过对模型施加与实际作业时一致的约束、载荷、接触和摩擦类型等,建立复杂机械系统的运动学仿真模型<sup>[25]</sup>。RecurDyn 采用相对坐标系运动方程理论和完全递归算法,求解迅速,可用于运动学、动力学等全面的模拟测试验证,通过仿真测试的数据、曲线和轨迹等结果可对系统功能进行改善和创新设计<sup>[26-28]</sup>。

## 3.1 模型建立

### 3.1.1 等效简化几何模型

为了提高计算速度,将标准件和不影响秸秆掩埋效果的零部件去除,在 SolidWorks 绘图软件完成实体模型装配,将装配好的秸秆掩埋装置导出存为 Parasolid(\*.x-t) 格式,导入 RecurDyn 的建模环境中,导入后所有装配体均以零件形式存在,装配关系依然存在,对于同样运动的零件需要利用合并(Merge)操作,对零部件合并简化。

### 3.1.2 添加约束和驱动

忽略零部件之间的摩擦类型和零部件的变形,将所有零部件假定为刚体,对装配体添加约束,主要约束类型如表 1 所示。

表 1 零部件之间的约束类型

Tab. 1 Type of constraint between components

零部件名称	约束类型
支架-栅栏	固定铰
支架-偏心轴	固定铰
旋耕刀辊-偏心轴	旋转副
支架-地面	平移副
伸缩指杆-偏心轴	旋转副
压秆齿-支架	旋转副

仿真设置机具前进速度  $v_m = 1$  m/s,旋耕刀辊转速  $n = 200$  r/min,前述压秆齿的旋耕速比  $\lambda = 1$ ,经计算解得角速度为 6.666 67 rad/s,取整为 7 rad/s,故对旋耕刀辊-偏心轴之间的旋转副添加驱动函数  $E_{x1} = (40/6)PI$ (PI 表示  $\pi$ ),支架-地面之间的平移副添加驱动函数  $E_{x2} = 1000$ ,压秆齿-支架之间的旋转副添加驱动函数  $E_{x3} = 7$ 。

### 3.2 秸秆掩埋装置运动分析

在 RecurDyn 后处理模块利用 Marker 点的轨迹追踪功能,追踪了伸缩指杆端点、刀片端点以及压秆齿端点的运动轨迹,提取了 0 ~ 2 s 运动时间内的数据点绘制成端点运动轨迹图,如图 13 所示(图中红色点为起始点)。对比伸缩指杆端点和旋耕刀片端点轨迹发现:伸缩指杆端点和旋耕刀片端点的运动轨迹均是余摆线,能够将秸秆和土壤向后方抛出;伸缩指杆的端点轨迹一直在旋耕刀片端点轨迹的前方,与旋耕刀片端点有一定的距离,与理论分析一致,伸缩指杆能够先接触前方未旋耕的秸秆与地表。观察压秆齿端点的运动轨迹发现,其轨迹为滚摆线,不能将秸秆和土壤向后方抛出,理论上能够实现按压秸秆而不带出秸秆的目的。

为了进一步分析三者的角速度、速度与时间的关系,提取 0 ~ 2 s 运动时间内的数据点绘制成带直线和数据点的散点图,如图 14 所示。

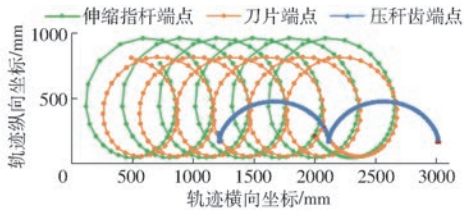


图 13 端点运动轨迹

Fig. 13 End point motion track

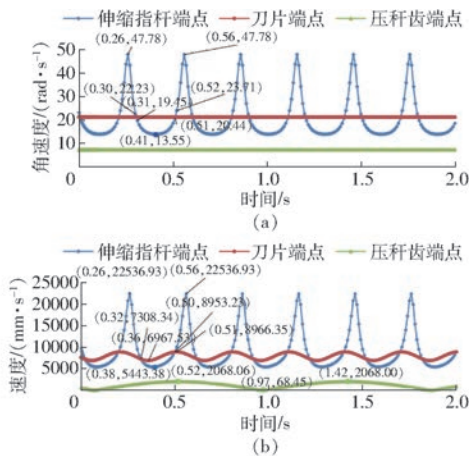


图 14 角速度与速度变化曲线

Fig. 14 Change curves of angular velocity and velocity

如图 14a 所示,刀片端点和压杆齿端点的角速度分别为  $20.94 \text{ rad/s}$  和  $7.00 \text{ rad/s}$ ,和前面设置的一致,伸缩指杆端点角速度周期为  $0.3 \text{ s}$ ,在  $0.26 \text{ s}$  时出现角速度最大值  $47.78 \text{ rad/s}$ ,在  $0.41 \text{ s}$  时出现最小值  $13.55 \text{ rad/s}$ ,角速度在  $0.26 \sim 0.41 \text{ s}$  随时间的增加而减小,在  $0.41 \sim 0.56 \text{ s}$  随时间的增加而增加,从图形形状和数据点关系可以看出其为轴对称图形,而且指杆端点在  $0.30 \sim 0.31 \text{ s}$  和  $0.51 \sim 0.52 \text{ s}$  出现和刀片端点相等的角速度,一个周期出现 2 次。如图 14b 所示,由于机具的前进速度  $v_m = (40/6)\pi > 0$ ,所以三者的速度均出现规律变化,指杆端点同样在  $0.26 \text{ s}$  出现最大值  $22536.93 \text{ mm/s}$ ,但最小值出现在  $0.38 \text{ s}$ ,为  $5443.38 \text{ mm/s}$ ,刀片端点在  $0.36 \text{ s}$  出现最小值  $6967.53 \text{ mm/s}$ ,在  $0.51 \text{ s}$  出现最大值  $8966.35 \text{ mm/s}$ ,指杆端点和刀片端点出现速度相等的时间分别是  $0.32 \text{ s}$  和  $0.50 \text{ s}$ ,速度分别为  $7308.34 \text{ mm/s}$  和  $8953.23 \text{ mm/s}$ 。压杆齿端点的速度在  $0.52 \text{ s}$  和  $1.42 \text{ s}$  出现最大值  $2068.00 \text{ mm/s}$ ,在  $0.97 \text{ s}$  出现最小值  $68.45 \text{ mm/s}$ ,从其图形形状和数据点关系可以看出其为轴对称图形,周期为  $0.9 \text{ s}$ 。

仿真结果表明:伸缩指杆的运动轨迹为余摆线,能够将秸秆向后抛出。压杆齿的运动轨迹为滚摆线,理论上能将秸秆压入土壤而不带出地表;速度和角速度变化规律与理论分析一致;旋耕刀端点速度大于伸缩指杆端点速度最小值,小于伸缩指杆端点速度最大值,因此本设计满足土秆分离原理,为加工

样机奠定了基础。

## 4 田间试验

### 4.1 试验条件

为了检验伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机作业性能,加工样机后在中国农业大学保护性耕作试验田进行秸秆掩埋机的田间试验。其整机的布置如图 15 所示。试验土壤为砂壤土,地表有秸秆覆盖,秸秆覆盖量为  $393 \text{ g/m}^2$ ,秸秆含水率为  $6.04\%$ ,在  $0 \sim 50 \text{ mm}$ 、 $50 \sim 100 \text{ mm}$ 、 $100 \sim 150 \text{ mm}$  深度处土壤含水率分别为  $9.82\%$ 、 $13.68\%$ 、 $12.68\%$ ,土壤紧实度分别为  $1.94$ 、 $2.02$ 、 $3.18 \text{ MPa}$ 。



图 15 秸秆旋耕掩埋机样机

Fig. 15 Prototype of straw rotary tillage burying machine

### 4.2 试验设计

实现玉米秸秆掩埋,可以使在小麦等农作物播种深度范围内的土壤更多、秸秆更少,为其提供良好种床,对小麦等农作物的生长具有重要意义。小麦播种深度与播种时间、地块土壤质量等有关,一般播种深度控制在  $20 \sim 40 \text{ mm}$  为宜<sup>[29-30]</sup>。

为检验秸秆旋耕掩埋机能否实现秸秆分离掩埋并将地表残余秸秆压入土壤,在机具正常作业速度  $3 \text{ km/h}$  下进行田间试验。试验设置:以普通旋耕机作业为对照组,秸秆旋耕掩埋机为试验组。

### 4.3 结果与分析

随机选取 3 点作为测试点,每点分别选取  $1 \text{ m}^2$ ,用筛子筛取收集距离地表  $0 \sim 50 \text{ mm}$  的秸秆带回实验室称量记为质量  $m_{X1}$ 、 $m_{X2}$ ,并计算距离地表  $0 \sim 50 \text{ mm}$  的秸秆平均质量  $m_Z$ ,记录结果如表 2 所示。

表 2 秸秆分布情况

Tab.2 Straw distribution results

掩埋方式	次序	$1 \text{ m}^2$ 秸秆质量/g
对照组	1	107.15
	2	113.24
	3	95.52
	平均值	105.30
试验组	1	72.21
	2	65.86
	3	59.46
	平均值	65.84

机具作业后,距离地表  $50 \text{ mm}$  秸秆覆盖率  $f$  计

算公式为

$$f = \frac{m_z}{m} \times 100\% \quad (19)$$

其中

$$m_z = \frac{m_{x1} + m_{x2}}{2} \quad (20)$$

式中  $m_{x1}$ ——第1次称量秸秆质量, g

$m_{x2}$ ——第2次称量秸秆质量, g

$m_z$ ——平均秸秆质量, g

$f$ ——秸秆覆盖率, %

$m$ ——试验前地表秸秆质量, g

将表2中的距离地表50 mm 秸秆质量  $m_z$  的计算结果代入式(19)计算得出:①以普通旋耕机作为对照组的机具作业后, 秸秆在距离地面0~50 mm 的覆盖率为26.80%。②以秸秆掩埋机为试验组的机具作业后, 秸秆在距离地面0~50 mm 的覆盖率为16.75%。

试验结果表明:普通旋耕机作业后地表50 mm 内秸秆掩埋率为73.20%, 秸秆掩埋机作业后距地

表50 mm 内秸秆覆盖率为83.25%, 秸秆掩埋率提高了10.05个百分点, 提高了秸秆的掩埋效果, 优化了种床质量, 有利于机具的通过性。

## 5 结论

(1)提出一种秸秆近抛下压、土壤远抛覆盖的土秆分离方法, 进行了伸缩指杆式玉米秸秆旋耕掩埋机关键部件的设计, 通过理论分析明确了伸缩指杆与旋耕刀速度、角速度的关系。

(2)采用运动学仿真模拟了秸秆旋耕掩埋机运动过程, 对偏心伸缩指杆组、旋耕刀和压秆齿的端点进行轨迹追踪和运动分析, 验证了理论分析的正确性。

(3)通过田间试验对比了秸秆旋耕掩埋机和普通旋耕机的作业效果, 对主要作业性能指标秸秆掩埋率进行测定分析得出:玉米秸秆旋耕掩埋机作业后距地表50 mm 以内的秸秆掩埋率为83.25%, 比普通旋耕机提高了10.05个百分点。

## 参 考 文 献

- [1] 赵宏波, 何进, 李洪文, 等. 秸秆还田方式对种床土壤物理性质和小麦生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 60-67.  
ZHAO Hongbo, HE Jin, LI Hongwen, et al. Effect of straw returning manners on seedbed soil physical properties and winter wheat growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 60-67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s009&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s009&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.009. (in Chinese)
- [2] 侯贤清, 李荣, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 238-246.  
HOU Xianqing, LI Rong, WU Pengnian, et al. Effects of straw returning with nitrogen application on soil carbon, nitrogen content and maize growth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 238-246. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180928&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180928&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.028. (in Chinese)
- [3] 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.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170501&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.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)
- [4] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 等. 控制灌溉下秸秆还田对稻田土壤氮素组成的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 229-238.  
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of straw returning on nitrogen composition in paddy soil under controlled irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 229-238. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191126&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191126&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.026. (in Chinese)
- [5] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2001, 32(5): 209-213.  
JIANG Yonghong, YU Zhenrong, MA Yongliang. The effect of stubble return on agro-ecological system and crop growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(5): 209-213. (in Chinese)
- [6] 胡立峰, 李洪文, 高焕文. 保护性耕作对温室效应的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 308-312.  
HU Lifeng, LI Hongwen, GAO Huanwen. Influence of conservation tillage on greenhouse effect[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 308-312. (in Chinese)
- [7] 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. Status and development analysis of comprehensive utilization of crop straw resources in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170501&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.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)
- [8] 胡立峰, 李琳, 陈阜, 等. 麦/玉两熟区农作模式分析及轮耕模式探讨[J]. 土壤, 2007, 29(2): 93-96.  
HU Lifeng, LI Lin, CHEN Fu, et al. Wheat/maize cropping patterns cropping area of analysis and shifting cultivation mode[J]. Soil, 2007, 29(2): 93-96. (in Chinese)
- [9] 刘小伟. 双辊秸秆还田旋耕机的研制开发[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.  
LIU Xiaowei. Research and development of double-roll straw returning tiller[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)



- [10] 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(增刊):83-85.  
XIA Junfang, XU Qichuan, ZHOU Yong. Research status and development trend of rotary tillage technology [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005(Supp.): 83-85. (in Chinese)
- [11] 周浩, 胡炼, 罗锡文, 等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊):117-123.  
ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and test of automatic leveling system for rotary tiller [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):117-123. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s018&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s018&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.018. (in Chinese)
- [12] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003.
- [13] 李玮, 张佳宝, 张丛志. 秸秆掩埋还田对黄淮海平原耕层土壤温度及作物生长的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2):243-248.  
LI Wei, ZHANG Jiabao, ZHANG Congzhi. Effects of burial return of straw to soil on soil temperature and crop growth in Huanghuaihai Plain [J]. Journal of Ecology and Environment, 2012,21(2): 243-248. (in Chinese)
- [14] 王忠江, 王泽宇, 司爱龙, 等. 秸秆与沼肥同步翻埋还田对秸秆腐解特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 271-277.  
WANG Zhongjiang, WANG Zeyu, SI Ailong, et al. Effect of synchronously burying and returning straw and biogas slurry to soil on straw decomposition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6):271-277. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170635&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170635&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.035. (in Chinese)
- [15] 王川, 邵陆寿, 施六林, 等. 秸秆深埋保护性耕作复合机具设计[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1):117-120.  
WANG Chuan, SHAO Lushou, SHI Liulin, et al. Design of compound equipment with the deep straw and conservation tillage [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1):117-120. (in Chinese)
- [16] 王瑞丽, 黄毅, 魏凤兰, 等. 秸秆深埋还田开沟扶垄犁设计及试验研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42(2):231-234.  
WANG Ruili, HUANG Yi, WEI Fenglan, et al. Design and testing of plough for deep furrowing and ridging of straw amendment fields[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011,42(2):231-234. (in Chinese)
- [17] 刘俊孝, 王浩, 王庆杰, 等. 玉米少免耕播种机带灭茬清理装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):139-147.  
LIU Junxiao, WANG Hao, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of strip cleaning device of no and minimum-tillage corn planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 139-147. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2018s018&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s018&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.018. (in Chinese)
- [18] 石勇. 旋耕秸秆混埋还田质量试验研究[D]. 南京:南京农业大学, 2015.  
SHI Yong. Experimental study on quality of mixed burial stalks returned to the field [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [19] 郑智旗, 何进, 王庆杰, 等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(7):92-101.  
ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(7):92-101. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170711&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170711&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.011. (in Chinese)
- [20] 田家治, 裴泽莲, 高占文, 等. 1LF-2型秸秆掩埋翻耕犁的设计[J]. 农业科技与装备, 2015(1):15-16.  
TIAN Jiazhi, PEI Zelian, GAO Zhanwen, et al. Design of type 1LF-2 straw burying tillage plow [J]. Agricultural Science&Technology and Equipment, 2015(1):15-16. (in Chinese)
- [21] 贾洪雷, 陈忠亮. 旋耕碎茬工作机理研究和通用刀辊的设计[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4):29-32.  
JIA Honglei, CHEN Zhongliang. Study on working principle of rotary tillage and stubble cutting and design of universal knife roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4):29-32. (in Chinese)
- [22] 贾洪雷, 黄东岩, 刘晓亮, 等. 耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4):111-116.  
JIA Honglei, HUANG Dongyan, LIU Xiaoliang, et al. Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4):111-116. (in Chinese)
- [23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [24] 王庆杰, 刘正道, 何进, 等. 砍切式玉米秸秆还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2):10-17.  
WANG Qingjie, LIU Zhengdao, HE Jin, et al. Design and experiment of chopping-type maize straw returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2):10-17. (in Chinese)
- [25] 胡鹏翔. 液体火箭的多体动力学建模与仿真研究[D]. 北京:清华大学, 2012.  
HU Pengxiang. Multibody dynamic modeling and simulation of liquid-propellant launch vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [26] LU Jinjun, WEI Laisheng, ZHAO Taoshuo. Experimental and simulation research of slip-ratio during star-up acceleration process of tracked vehicle based on RecurDyn[J]. Acta Armamentarii, 2009,30(10):1281-1286.
- [27] FANG Zifan, XIANG Bingfei, HE Qingsong, et al. Dynamic and control strategy of payload motion for deployment system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012,229-231: 2361-2364.
- [28] GE Weimin, ZHANG Huajin, WANG Xiaofeng, et al. The study and confirmation of kinematic general formula for chain-type self-reconfigurable robot[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 392: 277-280.
- [29] 武树军. 小麦播种深度和小麦长势的十个关系[J]. 河北农业, 2011(9):20-21.  
WU Shujun. Ten relationships between wheat sowing depth and wheat growth[J]. Hebei Agriculture, 2011(9):20-21. (in Chinese)
- [30] 黄海. 小麦的适宜播种深度[J]. 中国农垦, 1998(11):45.