

玉米根茬收获机设计与试验*

王俊发 马浏轩 邵东伟 葛宜元 刘新柱
(佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154007)

【摘要】 在大量试验的基础上设计了集挖茬、拾茬、清茬、引茬、集茬和侧位条铺于一体的玉米根茬收获机。整机主要由根茬挖掘装置、清理捡拾装置、链式输送装置及悬挂和液压系统等组成。适用于玉米、高粱等作物根茬的挖掘和集铺。该机具采用偏置柄式挖掘铲和弹性伸缩式捡拾机构,实现了对非藕联玉米根茬的地表下捡拾。田间试验结果表明:根茬漏拔率小于2.8%,生产率0.955~1.086 hm²/h,作业幅宽2.6 m,整机可靠性系数96.8%。

关键词: 玉米根茬 收获机 设计 田间试验

中图分类号: S225.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0068-05

Design and Experiment of Maize Root Stubble Harvester

Wang Junfa Ma Liuxuan Shao Dongwei Ge Yiyuan Liu Xinzhu
(School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

Abstract

A type of maize root stubble harvester based on a lot of test was designed. It can complete a serial of task including digging, picking, clearing, guiding, collecting and windrowing along side position in sequence. This harvester was consisted of the digging root stubble device, the clearing and picking device, the chain type transporting device, the suspension and hydraulic system, which was used for digging and collecting corn root stubble such as maize and sorghum. In this harvester, the digging shovel with offset handle and the flexible picking device with flex tooth were developed by self-innovation, which could finish picking process under surface for the root stubble of non-coupling maize. The field test results showed that the rate of non-picking root stubble was less than 2.8%, the productivity was 0.955~1.086 hm²/h, the operation broad width was 2.6 m and the reliability coefficient of the whole machine was 96.8%.

Key words Maize root stubble, Harvester, Design, Field experiment

引言

农作物根茬作为可再生生物质能源在我国数量大,分布广^[1~2],作物秸秆和根茬的年生产量约为9亿t,折合理论资源量为3.6亿t标准煤^[3~5],其中,年产作物根茬约为1亿t^[6]。玉米是种植面积最广,根茬数量最大的农作物之一,并且种植面积正逐年增大。目前生产中处理玉米根茬的方法是机械灭茬或人工焚烧后免耕播种。不仅浪费了大量的生物质资源,而且造成了环境污染。因此,开发研制玉米

根茬收获机具对解决我国能源问题具有重要的实际意义^[7]。华南农业大学在大量试验的基础上设计了基于三滚捡拾原理的玉米根茬收获样机^[8],取得了较好的试验效果,但目前国内外作物根茬收获机具尚属空白。本文设计玉米根茬收获机,并进行田间试验。

1 整机结构配置与工作过程

依据玉米根茬的生物学特性和力学特性分析^[9~10],基于TRIZ理论的组合原理,设计了集挖茬、拾茬、清茬、引茬、集茬和侧位条铺于一体的复合

收稿日期: 2012-01-28 修回日期: 2012-03-13
* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA043604)
作者简介: 王俊发,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械设计与试验研究, E-mail: wangjunf2934@sina.com

玉米根茬收获机^[11~12](图 1)。

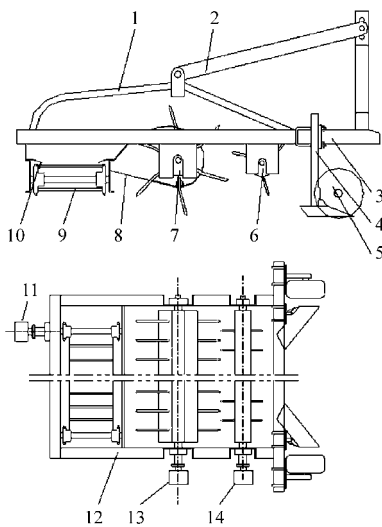


图 1 玉米根茬收获机工作原理简图

Fig. 1 Principle sketch of maize root stubble harvester

1. 上盖板 2. 上悬挂架 3. 下悬挂架 4. 偏置柄式挖掘铲 5. 限深轮 6. 辅助滚 7. 捡拾滚 8. 根茬导轨 9. 输送链 10. 挡板 11. 输送链马达 12. 机架 13. 捡拾滚马达 14. 辅助滚马达

工作过程如下:机具采用全悬挂方式作业,首先由偏置柄式挖掘铲将玉米根茬铲挖、移位,然后由捡拾滚将根茬前推,并在辅助滚配合下将根茬抬起,抛向后方输送链。输送链将 4 垄根茬汇集,输送到机具一侧。在此过程中,根茬携带的大部分土壤被抖落。捡拾滚、辅助滚和输送链均由液压马达驱动,并通过节流阀实现转速可调。

2 关键部件设计

2.1 挖掘机构设计与分析

2.1.1 挖掘机构的结构设计

玉米根茬挖掘是收获工艺的难点之一^[13]。它既要求不漏挖、牵引阻力小,又要保持根茬完整性,确保回收率。因此,设计中采用偏置柄式挖掘铲(图 2),该结构的特点是:作业中铲柄不接触土壤,犁铲从下部将根茬须根剪断,实现根茬移位。这样既可以保证玉米根茬的完整性,又可以减小牵引阻力、降低功耗。与传统犁铲相比^[14],该结构保持了根茬的完整性,对不同垄间距具有良好的适应性,有效解决了根茬漏挖现象^[15]。

2.1.2 偏置柄式挖掘铲主要工作参数

偏置柄式挖掘铲的主要功能是切断根茬须根,结构为截体三面楔。主要工作参数有:铲面倾角 γ 、铲刃滑切角 θ 、铲刃角 β 、入土深度 h 、前进速度 v_m 和铲长 L 等,如图 3 所示。

(1) 入土深度 h

北方玉米主根须一般在地下 10 ~ 12 cm^[10]。所

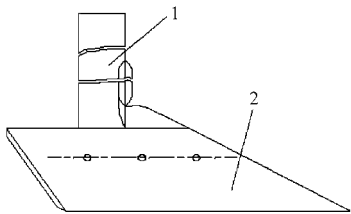


图 2 偏置柄式挖掘铲

Fig. 2 Digging shovel with offset handle

1. 铲柄 2. 铲刀

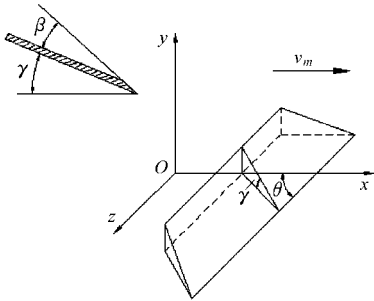


图 3 铲面倾角示意图

Fig. 3 Sketch of shovel obliquity

以挖掘铲入土深度 h 为 12 ~ 15 cm。

(2) 铲刃滑切角 θ

铲刃滑切角 θ 需使根茬须根沿铲刃口滑动以实现滑切。由图 4 可知,只有当根须阻力 R 沿刃口的分力 T 大于根须和刃口间的摩擦力 F 时,根须才能沿刃口后移,即 $T > F$,或

$$\theta < 90^\circ - \varphi \tag{1}$$

式中 φ ——根茬须根对铲刃的摩擦角

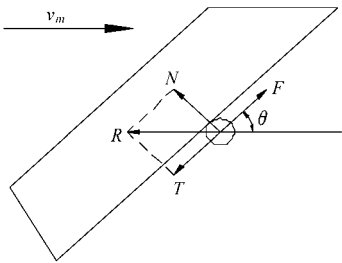


图 4 铲刃滑切角示意图

Fig. 4 Sliding cutting angle of shovel blade

阻力 R 主要取决于土壤的类型及其物理状态。考虑到玉米根茬的收获主要在秋季完成,所以确定铲刃滑切角 θ 为 $35^\circ \sim 40^\circ$ 。

(3) 铲面倾角 γ

铲面受力分析如图 5 所示,被铲起根茬及土块重量为 G ,沿铲面方向与垂直铲面方向分力分别为 G_1 和 G_2 ,铲面将重物掘起所需力 P 沿铲面与垂直铲面分力分别为 P_1 与 P_2 ,其临界平衡方程为

$$\begin{cases} N = G_2 + P_2 \\ P_1 = F_f + G_1 \end{cases} \tag{2}$$

其中

$$F_f = \mu N$$

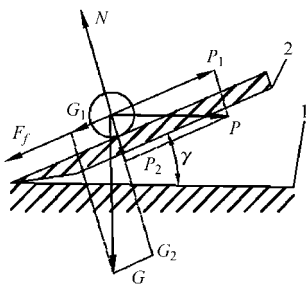


图5 根茬受力分析示意图

Fig. 5 Forces on root stubble

1. 铲切面 2. 铲刃

式中 F_f ——土壤与铲面摩擦阻力
 N ——铲面对土块支持力
 μ ——土壤与铲面摩擦因数

由式(2)得

$$\begin{cases} P\cos\gamma = mg\sin\gamma + \mu N \\ N = mg\cos\gamma + P\sin\gamma \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)解得铲面倾角为

$$\tan\gamma = \frac{P - \mu mg}{\mu P + mg} \quad (4)$$

若 $P_1 > F_f + G_1$, 根茬土壤团块将从铲面滑过, 落在铲的后方; 若 $P_1 < F_f + G_1$, 根茬土壤团块将从铲面滑下, 堆积在铲面前方产生壅土或壅根。由式(4)可导出

$$P = \frac{\sin\gamma + \mu\cos\gamma}{\cos\gamma - \mu\sin\gamma} mg \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 将土体中根茬挖出所需水平向力 P 与土壤团块质量 m 和铲面倾角 γ 有关。在土壤团块质量一定的情况下, 铲面倾角越大, 所受阻力越大。而倾角较小时则铲刃入土困难。

为了获得合理的设计参数, 本文以牵引阻力为评价指标, 以犁铲的铲面倾角 γ 、铲刃滑切角 θ 、入土深度 h 、前进速度 v_m 为影响因素, 结合对犁铲工作效果的观察, 采用四因素五水平正交旋转中心组合优化试验方法, 因素水平表见表1, 得到牵引阻力模型为

$$\begin{aligned} y = & 1.30 + 0.27\gamma + 0.45\theta + 0.56h + 0.25v_m + \\ & 0.21\gamma^2 + 0.24\theta^2 + 0.28h^2 - 0.01\gamma\theta + \\ & 0.01\gamma h - 0.05\theta h - 0.03\theta v_m + 0.06h v_m \end{aligned} \quad (6)$$

通过参数优化, 挖掘铲设计参数为: 铲面倾角 $\gamma = 30^\circ$ 、铲刃滑切角 $\theta = 40^\circ$ 、入土深度 $h = 12\text{ cm}$ 、前进速度 $v_m = 1.5\text{ m/s}$ 。

2.2 捡拾机构设计与分析

2.2.1 捡拾机构的结构设计

捡拾机构要求保持作物根茬完整, 无遗漏, 不堵塞, 功耗低, 并能去除根茬携带的大部分泥土^[16]。本文研发的弹性伸缩齿根茬捡拾机构, 由捡拾滚、辅助捡拾滚和上导板组成, 如图6所示。该机构可实

表1 因素水平编码
Tab. 1 Factors and levels

编码	因素			
	铲面倾角 $\gamma/(^\circ)$	铲刃滑切角 $\theta/(^\circ)$	入土深度 h/cm	前进速度 $v_m/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
2	36	50	18	2.5
1	33	45	15	2.0
0	30	40	12	1.5
-1	27	35	9	1.0
-2	24	30	6	0.5

现整幅捡拾, 无遗漏, 在被捡拾根茬非藕联条件下实现地表下捡拾。同时可以去除根茬携带的大部分土壤, 根茬破损率低, 不堵塞, 作业后地表平整、松软。它的工作过程是: 捡拾滚弹性齿将已被切断须根的根茬从地表下拾起, 在辅助滚的配合下, 把根茬向上升起, 然后捡拾齿与导茬板配合将根茬抛送至输送链上。

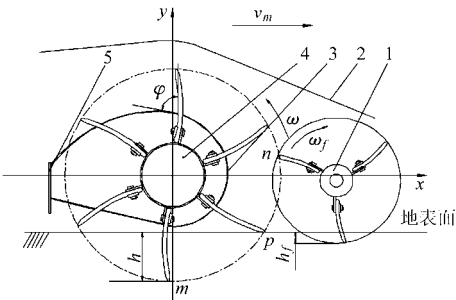


图6 弹性伸缩齿捡拾机构简图

Fig. 6 Sketch of flexible picking device with flex tooth

1. 辅助捡拾滚 2. 上导板 3. 弹性导板 4. 捡拾滚 5. 机架

与传统的捡拾机构相比, 它首次采用回转机构实现地下捡拾。它可将地表下 10 cm 内的根土混合体拾起, 且强度高, 可靠性好; 在被捡拾根茬非藕联条件下, 实现根茬捡拾率 99% 以上, 作业性能稳定。

2.2.2 捡拾机构的运动学分析

机具作业时, 捡拾滚上各点的运动轨迹均为余摆线, 捡拾齿齿尖运动方程为

$$\begin{cases} x = \rho\cos\omega t + v_m t \\ y = \rho\sin\omega t \end{cases} \quad (7)$$

式中 ρ ——捡拾滚回转半径, mm
 ω ——捡拾滚的回转角速度, rad/s

捡拾齿齿尖的回转线速度与机组前进速度之比为捡拾速比, 则

$$\lambda = \rho\omega/v_m \quad (8)$$

由图7, 根据文献[18], 得到

$$h_1 = \rho[1 - \cos(\pi/(Z(\lambda - 1)))] \quad (9)$$

式中 Z ——捡拾滚齿数
 h_1 ——漏拾区最大高度

设计中, 为确保不漏茬, h_1 应小于根土混合体重心的高度, 设计中取 $h_1 = \frac{1}{2}h$, 将式(8)代入式(9)

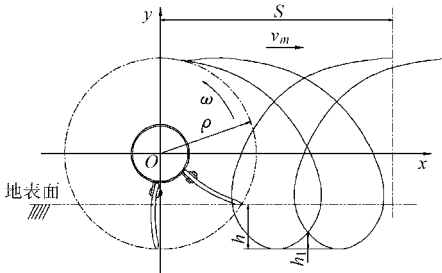


图 7 捡拾滚齿尖运动轨迹

Fig. 7 Movement track of picking tooth point

整理得到捡拾滚最低转速为

$$\omega_{\min} = \frac{v_m}{\rho} \left[1 + \frac{\pi}{Z \arccos \left(1 - \frac{h_l}{\rho} \right)} \right] \quad (10)$$

在确定齿数 Z 和回转半径 ρ 后,即可得到捡拾滚所需的最低转速。

同时,根土混合体作用在捡拾齿上,将会受到捡拾齿的作用,从图 6 中可以看出,在 p 点(地表)以下,根茬受到前方土壤作用,将会与捡拾齿一起运动,在 p 点和 n 点之间,根茬在辅助捡拾滚作用下仍不会脱离捡拾滚。 n 点以上其受力如图 8 所示。根土混合体沿齿面向外滑动,脱离捡拾滚向后抛送的临界条件为

$$m\rho\omega^2 \geq F_s \cos \varepsilon + F_N \sin \varepsilon + mg \sin \omega t \quad (11)$$

其中 $F_s = \mu F_N$ $F_N = mg \cos(\omega t + \varepsilon)$
式中 F_s ——根土混合体与齿面之间的摩擦力
 F_N ——根土混合体对齿面的正压力
 ε ——齿尖圆弧切线与齿尖回转半径的夹角

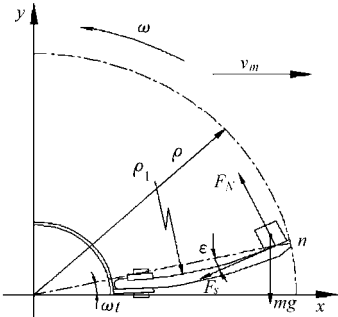


图 8 根土混合体与捡拾齿间的相互作用力

Fig. 8 Operation forces between picking tooth and complex of root stubble and earth

由式(11)得

$$\omega \geq \left\{ \frac{g}{\rho} [\mu \cos(\omega t + \varepsilon) \cos \varepsilon + \cos(\omega t + \varepsilon) \sin \varepsilon + \sin \omega t] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

式(12)是非线性方程,通过数值分析的方法,得到满足式(12)要求的 ω 变化规律如图 9 所示。

综合考虑式(10)和式(12),并通过试验,确定转速为 200 r/min, $\rho = 340$ mm, $\varepsilon = 18^\circ$ 。辅助捡拾滚

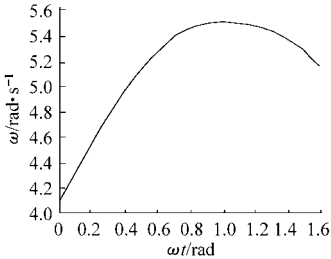


图 9 根茬脱离弹齿的临界角速度

Fig. 9 Critical angular velocity for stubble to separate from picking tooth

的作用除辅助完成捡拾功能之外,还需对捡拾滚起到清齿作用、避免堵塞,因此其转速应高于捡拾滚转速,其设计值取 300 r/min。

3 田间试验

2011 年 10 月,在黑龙江省佳南实验农场由黑龙江省农业机械试验鉴定站完成了机具田间作业性能测试,作业面积 35.6 hm²,样机参数、检测试验条件和检测结果如表 2~4 所示。经测试,整机可靠性系数 96.8%。

表 2 主要技术参数

Tab. 2 Main parameters

参数	设计值	测定值
外型尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	2 510×3 070×1 180	2 510×3 070×1 182
结构质量/kg	1 170	1 170
挖掘(起拔)深度调节范围/mm	0~350	0~350
根茬铺放宽度/cm	≤80	77.8
工作幅度/m	2.6	2.6
配套动力/kW	≥58.8	58.8
与拖拉机连接方式	三点悬挂	三点悬挂
动力输入轴转速/r·min ⁻¹	540	540
捡拾滚转速/r·min ⁻¹	200	180
辅助捡拾滚转速/r·min ⁻¹	300	280
输送链线速度/m·s ⁻¹	1.8	1.6

表 3 检测试验条件

Tab. 3 Testing conditions

项目	测定值
地势及坡度	平坦
土壤类型	普通黑土
前茬作物名称	玉米
垄高/cm	14.2
垄距/cm	65.2
根茬株距/cm	33.0
留茬高度/cm	11.0
根茬密度/株·m ⁻¹	4.9
根茬含水率/%	19.4
植被种类	玉米茬
植被密度/g·m ⁻²	4.9
土壤坚实度(0~15 cm)/kPa	395.56
土壤绝对含水率(0~15 cm)/%	22.5
土壤容重/kg·m ⁻³	1 322.5
配套动力/kW	58.8 (JOHN/DEERE804)

表 4 检测结果
Tab.4 Testing results

项目	标准要求	检测结果
根茬漏拔率/%	≤10	2.8
纯工作小时生产率/hm ² ·h ⁻¹	0.6~0.8	0.955~1.086
作业幅宽/m	≥2.0	2.6
根茬铺放宽度/cm	≤80	77.8
运输间隙/mm	≥300	510
机组水平通过半径/m	9.0	8.9

4 结论

(1)设计的玉米根茬收获机解决了玉米、高粱等作物根茬的回收问题,为高燃值作物根茬的合理利用提供了有效的方法。

(2)设计了偏置柄式挖掘铲和弹性伸缩齿根茬捡拾机构,丰富了根茎挖掘和捡拾理论,为相关机具的研发提供了参考。

(3)田间试验和测试结果表明,该机性能可靠,参数指标优于设计要求。

参 考 文 献

1 王亚静,毕于运,高春雨. 中国秸秆资源收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学, 2010,43(9):1 852~1 859.
Wang Yajing, Bi Yuyun, Gao Chunyu. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010,43(9):1 852~1 859. (in Chinese)

2 刘刚,沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分区[J]. 自然资源学报,2006,28(1):9~13.
Liu Gang, Shen Lei. Quantitive appraisal of biomass energy and its geographical distribution in China[J]. Journal of Natural Resources, 2006,28(1):9~13. (in Chinese)

3 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等. 中国农作物秸秆资源极其利用现状[J]. 农业工程学报,2002,18(3):87~91.
Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002,18(3):87~91. (in Chinese)

4 侯刚,李轶冰,席建超,等. 中国秸秆生物质发电区域适宜度分异评价[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(6):189~196.
Hou Gang, Li Yibing, Xi Jianchao, et al. Differentiation evaluation on regional suitability of crop straw resources utilization in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009,27(6):189~196. (in Chinese)

5 管小冬. 农作物秸秆资源利用浅析[J]. 农业工程学报,2006,22(1):104~106.
Guan Xiaodong. Analysis of crop stalk utilization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(1):104~106. (in Chinese)

6 邵东伟. 玉米根茬收获机仿真研究[D]. 佳木斯:佳木斯大学,2010.

7 戎志梅. 从战略高度认识开发生物质能产业的重要意义[J]. 精细化工原料及中间体,2006(7):7~10.

8 马旭,陈学深,齐龙,等. 玉米根茬收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):21~25.
Ma Xu, Chen Xueshen, Qi Long, et al. Design and experiment of root stubble harvester for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.):21~25.

9 刘晶淼,安顺清,廖荣伟,等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究[J]. 中国生态农业学报,2009,17(3):517~523.
Liu Jingmiao, An Shunqing, Liao Rongwei, et al. Temporal variation and spatial distribution of the root system of corn in a soil profile[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2009,17(3):517~523. (in Chinese)

10 牟金明,李万辉,迟力加,等. 玉米根茬还田与玉米根系的空间分布[J]. 吉林农业大学学报,1999,21(4):47~51.
Mou Jinming, Li Wanhui, Chi Lijia, et al. Corn stubble in field and corn root space distribution[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1999,21(4):47~51. (in Chinese)

11 王俊发,马浏轩,周海波,等. 玉米高粱根茬起铺机:中国,ZL200920266399.2[P]. 2010-08-11.

12 马浏轩,王俊发,初旭宏,等. 作物根茬起铺机:中国,ZL201020671441.X[P]. 2011-10-05.

13 Ma Liuxuan, Chu Xuhong, Qiu Congyu. Computer adided design ang simulation analysis for mastsune shovel of stubble havester[C]//2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan, China, 2010:381~387.

14 权龙哲,佟金,曾百功,等. 玉米根茬铲切刀具的滑切刃曲线优化设计[J]. 农业工程学报,2011,27(12):13~17.
Quan Longzhe, Tong Jin, Zeng Baigong, et al. Optimization design of sliding cutting edge curve of corn rootstalk cutting tool [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011,27(12):13~17. (in Chinese)

15 马浏轩,王俊发,葛宜元,等. 一种减阻组合犁铲:中国,ZL201120195353.3[P]. 2011-06-15.

16 葛宜元,王俊发,杨传华,等. 玉米根茬起铺机捡拾装置:中国,ZL201020670757.9[P]. 2011-08-10.

17 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,2007:235.