doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.016

密植棉秆对行铲拔铺放机设计与试验

贺小伟[1,2]　刘金秀[2,3]　王旭峰[2,3]　徐　杨[1]　胡　灿[1,2]　李义博[1]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300;
3. 新疆维吾尔自治区普通高等学校现代农业工程重点实验室, 阿拉尔 843300)

摘要: 为实现机采棉密植棉秆机械化对行、低耗收获目标,融合机采棉宽窄行密植种植农艺要求,基于对行低耗铲切方法和反向推拔作用原理,设计了一种密植棉秆对行铲拔铺放机。简述了整机结构和工作原理,结合相关作业性能要求,通过分析计算确定了对行铲切装置、铲切调节装置和齿型推拔辊的结构参数,并完成了关键部件的工作参数分析,确定对行铲切装置最小铲倾角为 5°、铲切调节装置铲倾角调节范围为 5.00°~8.95°、齿型推拔辊转速取值范围为 97.66~391.16 r/min。田间试验表明,该机可实现压、铲、拔、铺放棉秆等多项作业,且具有分离泥土的功能;根据试验田密植棉秆根系扎根深度,调整机组使对行铲切装置铲切深度约为 11.5 cm,此时对应铲倾角约为 7.1°,齿型推拔辊旋转半径为 245 mm;当机组作业速度为 2.76~3.39 km/h、齿型推拔辊转速为 156~174 r/min 时,该机拔净率为 90.87%~91.42%,生产率为 0.63~0.77 hm^2/h,机组作业性能稳定,满足密植棉秆对行整秆铲拔作业要求。

关键词: 密植棉秆; 对行铲拔铺放机; 性能试验

中图分类号: S225.91+2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0142-10　　**OSID**:

Design and Experiment of Row-controlled Shoveling and Drawing Placement Machine for Cotton-stalks Based on Agronomy of Close Planting

HE Xiaowei[1,2]　LIU Jinxiu[2,3]　WANG Xufeng[2,3]　XU Yang[1]　HU Can[1,2]　LI Yibo[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Tarim University*, *Alar* 843300, *China*
3. *The Key Laboratory of Colleges and Universities under the Department of Education of Xinjiang Uygur Autonomous Region*, *Alar* 843300, *China*)

Abstract: Mechanized harvesting of cotton-stalks was the precondition of its industrial utilization on a large scale. In order to achieve the goal of row-controlled and low-consumption of mechanized harvesting cotton-stalks with close planting, combining the technical requirements of the agronomy of close planting with wide and narrow row of cotton, a kind of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks was designed based on the method of row-controlled and low-consumption shoveling and the principle of reverse pushing and drawing. The structure and working principle of the whole machine were briefly described. Combining with the requirements of the relevant operation performances, the structural parameters of the row-controlled shoveling device, the adjustment device of shoveling and the pushing-drawing roller that was tooth-shaped were determined through theoretical analysis and calculation, and the working parameters of the key components were analyzed. It was determined that the minimum shoveling angle of the shoveling device was 5.00°, the regulation range of shoveling angle was 5.00°~8.95°, and the range of rotational speed of the pushing-pulling roller with tooth type was 97.66~391.16 r/min. The field test results showed that the machine could realize many operations, such as pressing, shoveling, pulling and laying cotton-stalks, and had the function of separating soil. The parameters of the machine were adjusted. According to the depth of root system of cotton-stalks in the test

收稿日期: 2020-07-20　修回日期: 2020-08-12

基金项目: 塔里木大学现代农业工程重点实验室开放课题项目(TDNG2020201)、兵团重大科技项目(2018AA001/03)、国家重点研发计划项目(2016YFD0300302)和兵团重点研发计划项目(2019AB007)

作者简介: 贺小伟(1987—),男,博士生,塔里木大学讲师,主要从事现代农业装备设计与智能测控研究,E-mail: xiaoweimeixin@163.com

通信作者: 徐杨(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机械及其自动化研究,E-mail: xuyang@cau.edu.cn

field, when the shoveling depth of the row-controlled shoveling device was about 11.5 cm, the shoveling angle was about 7.1° and the rotational radius of the pushing-pulling roller with tooth type was 245 mm. When the working speed of machine was 2.76 ~ 3.39 km/h and the rotating speed of the pushing-pulling roller with tooth type was 156 ~ 174 r/min, the pulling rate was 90.87% ~ 91.42%, and the productivity was 0.63 ~ 0.77 hm^2/h. The row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks had stable operation performance, which can meet the design requirements of shoveling and drawing for whole stalks based on the agronomy of close planting.

Key words: close planting cotton-stalks; row-controlled shoveling and drawing placement machine; performance experiment

0　引言

棉花是我国主要经济作物之一[1]。目前,新疆棉花生产规模持续稳居全国之首。2019 年,新疆棉花种植面积为 2.54×10^6 hm^2,占全国的 76.08%,棉花总产量为 5×10^6 t[2]。若按皮棉草谷比平均值 5.02 计算[3],则新疆棉秆总产量达到 2.51×10^7 t,棉秆产量占全国的 84.94%[2]。棉秆作为棉花产业的副产品,是一种极具开发利用潜力的农业可再生资源,在农畜业、工业、能源、环保领域有着十分广泛的用途[4-9]。随着棉秆高效转换技术的不断增加,棉秆的需求量将不断提高,新疆棉区亟需高水平的棉秆收获机械。

国内外学者在棉秆收获技术及装备设计方面已取得一些成果。现有的棉秆收获按对行作业方式分为不对行收获和对行收获两大类[10]:剪切式不对行收获方法具有适收范围广、作业效率高的优点,但存在棉秆根茬留地的问题,不利于后续耕整、播种作业和农作物的生长[11-12];横辊齿刀式不对行收获方法具有可跨区作业的优点,但存在功率消耗高的问题,不符合绿色发展的需求[13-16]。铲切式对行收获方法多采用单翼铲或双翼铲,完成单一的棉秆铲切作业,生产效率低,且存在功耗高、根茬携带泥土多等问题[17-18];齿盘式、链夹式、对辊式、圆盘式对行收获方法主要适于种植行距较宽的等行距棉秆,仅可针对长江中下游棉区和黄淮海棉区的棉秆进行对行起拔收获,且拔净率受土壤条件和种植行距的影响较大,适收范围小、作业效率低[19-24]。

随着棉花采收机械化进程的不断推进,结合新疆自然生态条件,在不降低棉花产量和配套采棉机机械化作业的前提下,新疆机采棉种植新农艺以行距超窄配置为特点,广泛采用(66 + 10) cm 宽窄行密植种植模式[25-26]。对行收获方法作业功耗低,符合绿色发展的要求,但现有对行收获方法并不适用于新疆机采棉密植棉秆的收获,亟待开发与密植栽培农艺相配套的对行收获方法及装备。

本文在课题组前期研究基础上[27-28],结合机采棉密植农艺,基于对行低耗铲切方法和反向推拔作用原理设计一种密植棉秆对行铲拔铺放机,对其关键作业部件进行结构设计及计算分析,并开展田间试验进行性能验证。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

基于密植农艺的棉秆对行铲拔铺放机主要由机架总成、三点悬挂架总成、动力传动系统、压秆装置、限深轮总成、对行铲切装置、铲切调节装置、齿型推拔辊、脱秆装置等部件组成,结构如图 1 所示,其中对行铲切装置、铲切调节装置和齿型推拔辊为主要工作部件。

1.2　工作原理

基于密植农艺的棉秆对行铲拔铺放机采用对称

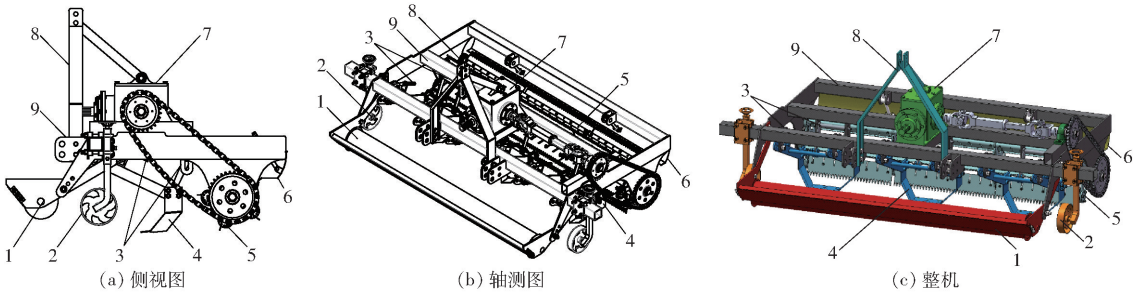


图 1　对行铲拔铺放机整机结构图

Fig. 1　Structure of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks

1. 压秆装置　2. 限深轮总成　3. 铲切调节装置　4. 对行铲切装置　5. 齿型推拔辊　6. 脱秆装置　7. 传动系统　8. 三点悬挂架总成　9. 机架总成

配置方式悬挂在动力机上,其动力传动路线如图 2 所示,通过万向伸缩传动轴将拖拉机的动力输出轴与锥齿轮变速箱的动力输入轴相连,再经锥齿轮变速箱的左动力输出轴连接万向节将动力传递给链传动,最后经链传动减速并将动力传递到齿型推拔辊驱动其旋转。锥齿轮变速箱到侧边链传动之间采用万向节传动,可降低整机组装中对连接轴的同轴度要求,且便于拆装。

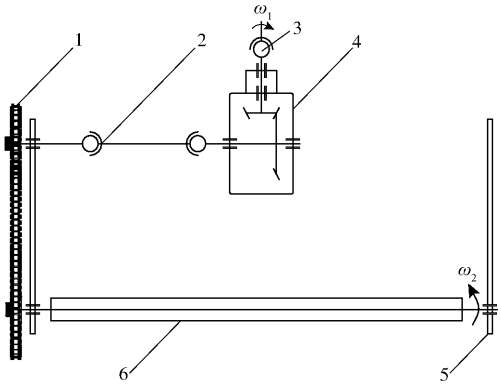


图 2 动力传递线路图

Fig. 2 Sketch of power transfer routing

1. 链传动 2. 万向节 3. 万向伸缩传动轴 4. 锥齿轮变速箱 5. 机架侧板 6. 齿型推拔辊

作业机组实物如图 3 所示,轮式拖拉机悬挂机构不仅起传递牵引力的作用,还可以通过调节其高度达到控制铲切深度的目的。作业机组前行时,布置在机架前端的压秆装置首先接触棉秆并将其推压至伏卧状态,接着铲切装置前端入土并保持一定的铲倾角对棉茬根部进行铲切,同时将整株棉秆及棉茬上附带土壤抬升至接近土壤表层位置,后置的齿型推拔辊在棉秆主干底端夹持棉秆,通过反向旋转完成棉秆提拔作业,并及时将整株棉秆沿切线方向抛拨于田间进行铺放,棉茬上携带的土壤在向后方运动过程中分离,最后安装在机架后梁上的脱秆装置将滞留在齿型拔秆辊上的棉秆、棉枝及残膜脱离掉,以利于齿型拔秆辊逆时针旋转重新进入下一次的推拔作业,工作原理示意图如图 4 所示。



图 3 棉秆对行铲拔铺放作业机组实物图

Fig. 3 Diagram of row-controlled shoveling and drawing placement working unit for cotton-stalks

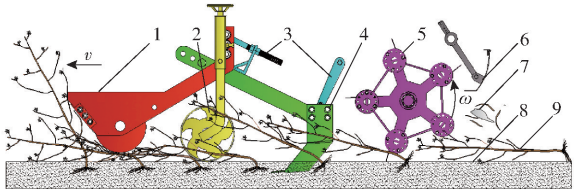


图 4 工作原理图

Fig. 4 Working schematic

1. 压秆装置 2. 限深轮 3. 铲切调节装置 4. 对行铲切装置 5. 齿型推拔辊 6. 脱秆装置 7. 残膜、棉枝 8. 土壤 9. 棉秆

作业时,压秆装置上的压秆辊可旋转,与棉秆接触时摩檫力较小,且压秆辊最低端距地面 5 ~ 10 cm,适宜的作业高度可避免棉秆在推压过程中被折断,同时在压秆装置推压作业时使得棉枝聚拢,有利于后续作业时整株棉秆从对行铲切装置中顺利通过。该机组作业紧凑有序,一次作业便可完成多项工序,可实现棉秆的整秆收获。

1.3 主要技术指标

新疆棉区适宜机采的 1 膜 6 行宽窄行(66 + 10) cm,株距 9.6 ~ 12.27 cm(采用不同穴数的精量穴播器播种时,株距会随之变化),密植种植模式如图 5 所示,目前新疆生产建设兵团 90% 的棉田采用该种植模式[25]。设计的密植棉秆对行铲拔铺放机整机主要技术参数如表 1 所示。

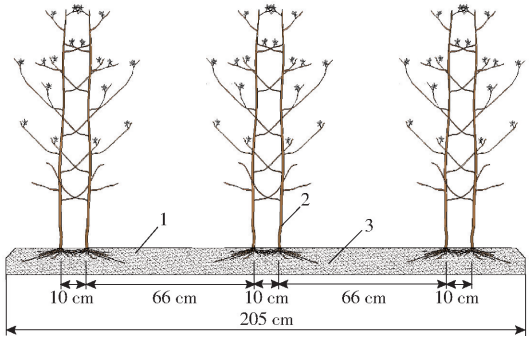


图 5 机采棉(66 + 10) cm 密植种植模式行距示意图

Fig. 5 Row spacing diagram of cotton with harvesting machinery (66 + 10) cm in close planting mode

1. 地膜 2. 棉秆 3. 土壤

表 1 整机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of operation machine

参数	数值
整机尺寸(长 × 宽 × 高)/(m × m × m)	1.63 × 2.58 × 1.31
工作幅宽/m	2.28
作业深度/mm	80 ~ 135(可调)
作业行数	6
配套动力/kW	≥23.69[27]
传动系统总传动比	2.78
整机质量/kg	607

2　关键部件设计与分析

2.1　对行铲切装置

对行铲切装置是影响该机具作业质量的关键部件，主要由铲切挂接架、梯形框架和对行铲切板组成，如图 6 所示；对行铲切装置进行入土、切削土壤、切断棉茬主根系和抬升棉茬及附带土壤的作业。对行铲切装置通过铲切挂接架与机架连接，梯形框架通过螺栓、螺母固结在铲切挂接架上，对行铲切板铆接在梯形框架的底板上。对行铲切板与梯形框架上带刃口的侧板部分（对行铲切板和一部分侧板入土作业）用优质碳钢制造，且对该部分进行了淬火处理，淬火硬度达到 HRC50 ~ 55。单组对行铲切装置工作幅宽 410 mm，针对（66 + 10）cm 机采棉宽窄行种植模式中 2 行窄行距棉秆进行对行铲切作业，该机具共配置了 3 组对行铲切装置，每组间隔 350 mm，对 1 膜 6 行密植种植农艺的棉秆进行对行铲切作业。

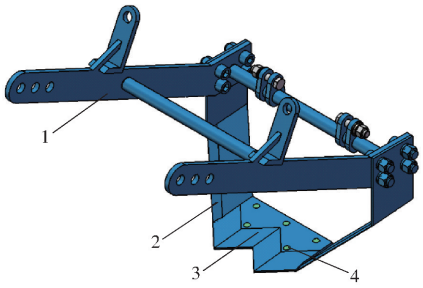


图 6　单组对行铲切装置

Fig. 6　Single row-controlled shoveling device

1. 铲切挂接架　2. 梯形框架　3. 对行铲切板　4. 铆钉

如图 7 所示，梯形框架包括底板和 2 个铲切侧板，板厚度为 10 mm，两边侧板相互对称地固接在底板两端，夹角为 90°，形成上宽下窄、前窄后宽的前倾梯形式结构，有利于倒伏状的蓬松棉秆从框架中通过。

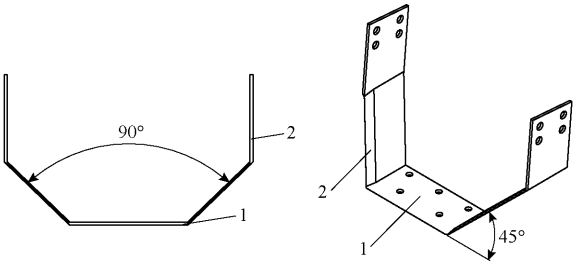


图 7　梯形框架

Fig. 7　Trapezoid frame

1. 底板　2. 铲切侧板

如图 8 所示，铲切板为平板式，前端为带斜刃的三角形铲，进行破土、切土作业，且能够将棉茬根部切断；后端为等宽平板，与前端倾斜角相同，将切断的棉茬及附着的土壤进行抬升。每个对行铲切板前端设置 2 个铲尖，每个铲尖正对 2 行窄行距棉茬根系。对行铲切装置主要参数有：最小铲倾角 α_1、铲刃斜角 β、铲切板长度 L、铲切侧板滑切角 γ、铲切板宽度 B_1 和 B_2。

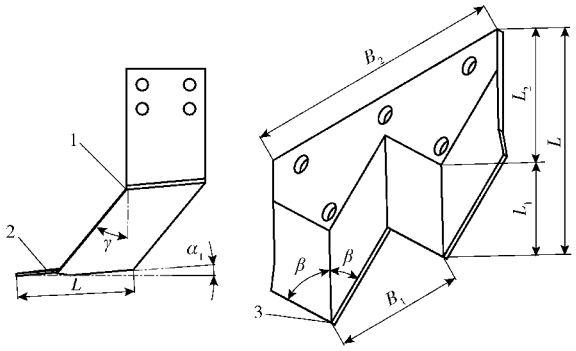


图 8　梯形框架和铲切板

Fig. 8　Shoveling frame and shoveling plate

1. 梯形框架　2. 铲切板　3. 铲尖

（1）最小铲倾角 α_1

铲倾角 α 为平板式铲面与地面之间的夹角；对行铲切装置的作业高度及铲倾角均可调，铲倾角 α 越小，铲的阻力越小，切土性能也越好；同时为保证梯形框架后端有足够高度空间，以使棉秆顺利通过、不拥堵，铲倾角不能过大，设计时取最小铲倾角 α_1 为 5°[29-30]。

（2）铲刃斜角 β

为减小铲切板与土壤接触产生的粘附力、降低铲切阻力，铲切板前端为带斜刃的三角形铲，设计时铲刃斜角 β 取 46.5°、刃口端厚度为 1.5 mm，经田间试验证明，该值能够满足作业要求，在沙壤土中脱土性能较好。

（3）铲切侧板滑切角 γ

梯形框架上的 2 个铲切侧板前端开有刃口，铲切侧板滑切角 γ 为刃口边线与竖直平面之间的夹角；根据梯形框架整体尺寸，滑切角 γ 不易过大，滑切角越大，则梯形框架前倾程度越大，致使铲切侧板强度明显降低，设计时滑切角 γ 取为 40°，使得铲切侧板入土部分以连续滑切的方式切开两侧土壤，有效降低侧切阻力、减小侧切过程中铲切装置受到的冲击力；铲切板面与地面之间的夹角为 45°（图 7），保证梯形框架从下向上的宽度等量连续增加，侧板从侧面等分量分割纵断面土壤。

（4）铲切板长度 L

铲切板前端完成切土、切根系任务，后端起抬升棉秆及附带土壤的作用，根据单个土壤-棉根系复合体大小及棉秆株距范围（9.6 ~ 12.27 cm）取铲切板总长度 L 为 148 mm、铲切段长度 L_1 为 68 mm、抬升

段长度 L_2 为 80 mm,其中 L_2 小于棉秆株距,使得抬升作业时在铲切板上横向最多有 2 个土壤-棉根系复合体,以减小工作阻力。

(5)铲切板宽度 B_1 和 B_2

该机具基于密植棉秆的种植农艺设计(图 5),单组铲切装置完成 2 行窄距棉秆对行铲切作业,铲切板前端宽度 B_1 设计为 100 mm;如图 9 所示,棉茬主根竖直向下生长,支根依附于主根向四周生长;根据田间实际测量,在铲切板工作深度范围内,密植棉秆棉茬中较大支根横向分布长度不超过 100 mm,所以铲切板后端宽度 B_2 取 200 mm。



图 9 棉秆根系在土壤中的分布情况

Fig. 9 Distribution of root system of cotton-stalks in soil

2.2 铲切调节装置

如图 10 所示,铲切调节装置主要由调节螺栓和变位拉杆组成。对行铲切装置通过铲切挂接架与前横梁的纵向链接耳连接,调节螺栓头部与前横梁上的横向链接耳链接,带螺纹部分与铲切挂接架连接,变位拉杆上端通过宽槽口链接耳与机架中横梁链接,下端挂接对行铲切装置。铲切调节装置通过改变调节螺栓和 2 个紧固螺母的螺旋位置使得对行铲切装置倾斜角发生变化,当调整到一定的角度后,紧固变位拉杆,从而达到调节铲倾角 α 的目的。铲切挂接架上端开有 3 个连接孔,当不同的孔与前横梁的纵向链接耳连接时,对行铲切装置相对高度发生变化,铲倾角 α 可调节范围也不同,且对行铲切装置与后置齿型推拔辊之间的水平间距也会随之改变,从而增加了机具作业参数的可调节性,以适应不同的棉秆品种、不同的田间作业条件。

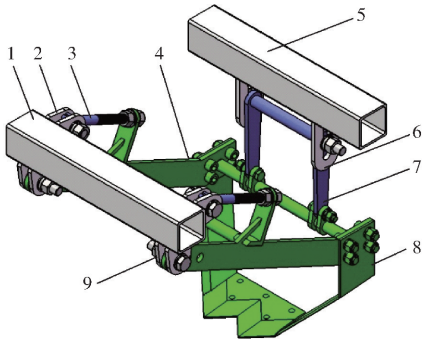


图 10 单组铲切调节装置

Fig. 10 Single shoveling adjustment device

1. 前横梁 2. 横向链接耳 3. 调节螺栓 4. 铲切挂接架 5. 中横梁 6. 宽槽口链接耳 7. 变位拉杆 8. 对行铲切装置 9. 纵向链接耳

(1)上端孔链接

铲切挂接架上端孔与前横梁的纵向链接耳连接时,从最小铲倾角($\alpha_1=5°$)开始调节,如图 11 所示,铲倾角 α 可调节范围为 5.00°~8.95°。

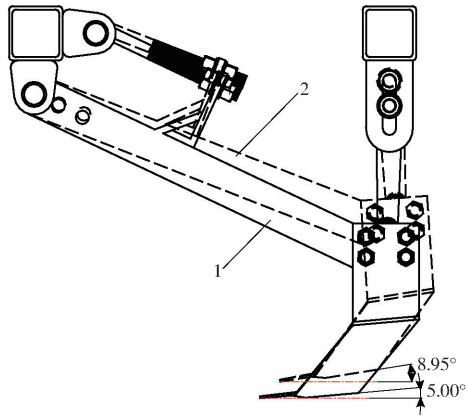


图 11 上端孔链接时铲倾角调节范围示意图

Fig. 11 Schematic of adjustment range of shovel angle when linking was in upper hole

1. 最小铲倾角时调节装置位置关系 2. 最大铲倾角时调节装置位置关系

(2)中间孔链接

铲切挂接架中间孔与前横梁的纵向链接耳连接时,从最小铲倾角($\alpha_1=5°$)开始调节,如图 12 所示,铲倾角 α 可调节范围为 5.00°~7.60°。

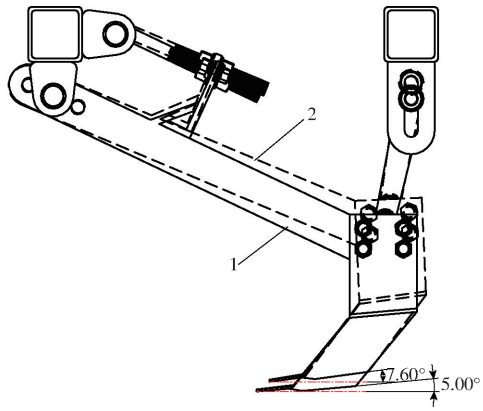


图 12 中间孔链接时铲倾角调节范围示意图

Fig. 12 Schematic of adjustment range of shovel angle when linking was in middle hole

1. 最小铲倾角时调节装置位置关系 2. 最大铲倾角时调节装置位置关系

(3)下端孔链接

铲切挂接架下端孔与前横梁的纵向链接耳连接时,从最小铲倾角($\alpha_1=5°$)开始调节,如图 13 所示,

铲倾角 α 可调节范围为 5.00°～7.10°。

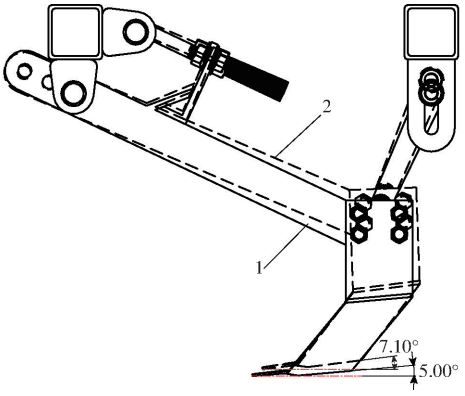


图 13　下端孔链接时铲倾角调节范围示意图

Fig. 13　Schematic of adjustment range of shovel angle when linking was in bottom hole

1. 最小铲倾角时调节装置位置关系　2. 最大铲倾角时调节装置位置关系

2.3　齿型推拔辊

齿型推拔辊是完成棉秆起拔的关键部件，对经铲切抬升后的整株棉秆进行逆向推拔作业，使得棉秆完全从土壤中拔出并铺放。如图 14 所示，齿型推拔辊由齿型板、拔秆轴、支撑盘和辊轴等组成。辊轴的两端通过花键轴头、轴承和轴承座连接在机架左右两个侧板上，辊轴上共焊接 4 个支撑盘，支撑盘将辊轴分为 3 个工作段，分别对 1 膜 6 行中 3 对窄行距棉秆进行推拔作业，每个工作段内沿支撑盘外圆周向均布 5 个拔秆轴，拔秆轴两端连接于两侧支撑盘，齿型板安装在拔秆轴上。

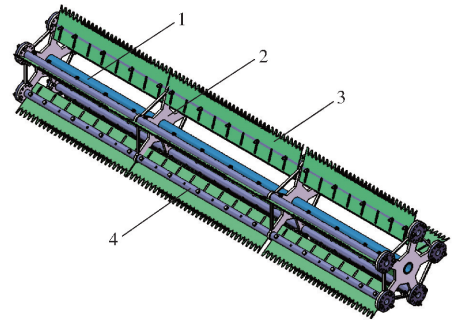


图 14　齿型推拔辊

Fig. 14　Pushing-pulling roller with tooth type

1. 辊轴　2. 支撑盘　3. 齿型板　4. 拔秆轴

2.3.1　齿型板结构参数

如图 15 所示，齿型板由板体、锯片和 V 形刀齿组成。板体上开有 U 形槽，通过 U 形槽可改变齿型板与拔秆轴连接位置，从而改变齿型推拔辊的旋转半径；根据齿型板与棉秆主干底部作业点位置高度值（距离地面高度为 20～90 mm，该范围为棉秆主干底部没有支干的高度范围）及作业时对行铲切装置铲切深度（80～135 mm），设定齿型推拔辊回转半径 R 为 230～300 mm；具体作业时，可根据棉花品种及作业点位置高度，对齿型推拔辊回转半径进行调节，以免齿型板入土深度过大或作业点位置过高，确保齿型板在适宜的作业点位置高度处进行棉秆推拔作业。V 形刀齿位于齿型板前端，顶部成圆弧状，有利于将棉秆导入 V 形刀齿中；V 形刀齿推拔棉秆时有 2 个工作点，并在每个 V 形刀齿两侧安装 2 个锯片，以增大推拔力。

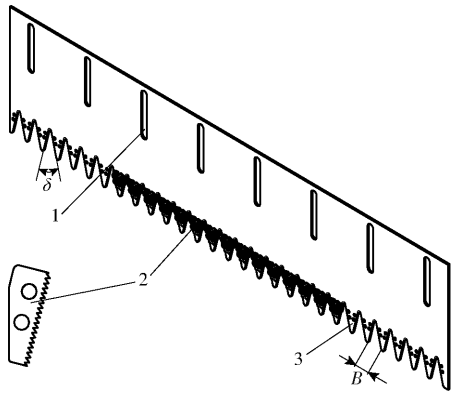


图 15　齿型板结构图

Fig. 15　Structure of tooth-shaped plate

1. 板体　2. 锯片　3. V 形刀齿

齿型板重要结构参数包括 V 形刀齿开口宽度 B 和齿形角 δ。为达到有效推拔并降低刀齿与棉秆之间的滑移度，齿宽 B 和齿形角 δ 应满足

$$\begin{cases} B \geqslant D \\ \delta \leqslant \xi \end{cases} \tag{1}$$

式中　D——密植棉秆底部主干直径，mm

ξ——钢材与棉秆间摩擦角，(°)

为保证有效夹持、推拔以及棉秆易于从刀齿中脱落，V 形刀齿齿形角不能过小，根据钢材与棉秆间摩擦角 $\xi = 29.1°$[14]，设计时齿形角 δ 取 28°。为保证棉秆顺利导入 V 形刀齿，V 形刀齿开口宽度不能过小，根据田间测量得出密植棉秆底部主干直径范围为 4.14～12.32 mm，设计时取开口宽度 B 为 18 mm。

2.3.2　反向推拔棉秆受力分析

棉秆经铲切作业后，整株棉秆及棉茬上附带的土壤被抬升至接近土壤表层位置，后置的齿型推拔辊在棉秆主干底端夹持棉秆，夹持位置可通过调节齿型推拔辊回转半径 R 进行调整；由于棉秆主干部分直径从上往下逐渐增加，采用反向推拔作业原理，更有利于棉秆导入 V 形刀齿并进行有效夹持，且使得 V 形刀齿及锯片对棉秆产生较大的静摩擦力 f。

棉秆在反向推拔瞬间受力分析如图 16 所示，其中齿型板对棉秆的推力 F_1、V 形刀齿及锯片对棉秆的静摩擦力 f、棉秆被 V 形刀齿及锯片向后下方推拔变形产生的弹力 F_2 的合力形成棉秆的拔取力 F。回转的 V 形刀齿及锯片在接触棉秆瞬间产生的拔

取力 F,克服棉秆与土壤的复合力、棉秆及棉茬上附带土壤的重力,棉秆被反向拔起,拔起的棉秆在离心力和后端挡板阻挡等作用下离开 V 形齿刀并铺放于田间。

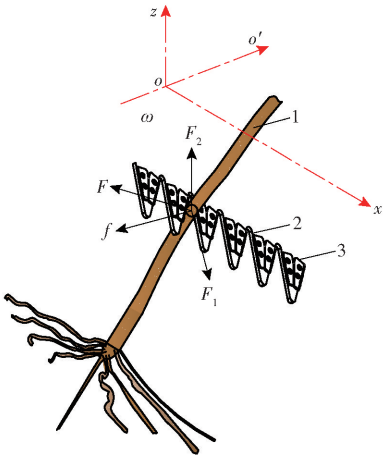


图 16 棉秆受力分析图

Fig. 16 Stress analysis graph of pulling cotton-stalks

1. 棉秆 2. V 形刀齿 3. 锯片

2.3.3 齿型推拔辊运动分析

(1)V 形刀齿运动方程

机组工作时,齿型推拔辊上的 V 形刀齿一面旋转,一面随机组前进,因此 V 形刀齿的绝对运动是辊轴旋转和机组前进两种运动的合成,其运动轨迹为摆线[31-32]。

设齿型推拔辊旋转中心为坐标原点,x 轴正向与机组前进方向一致,y 轴正向垂直向下(图 17),开始时 V 形刀齿推拔点位于前方水平位置(A 点)与 x 轴正向重合,当经过时间 t 后转动到 B 点,则 V 形刀齿推拔点运动方程为

$$\begin{cases} x = R\cos(\omega t) + v_m t \\ y = R\sin(\omega t) \end{cases} \tag{2}$$

式中 v_m——机组前进速度,m/s

ω——齿型推拔辊旋转角速度,rad/s

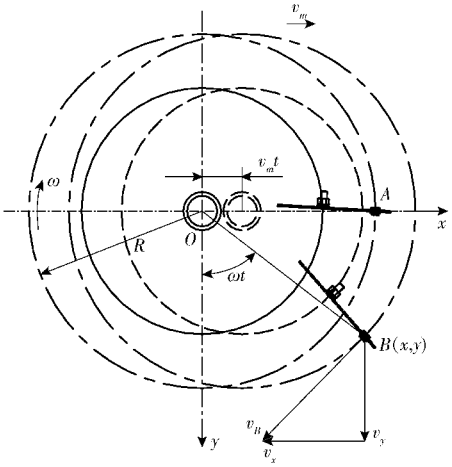


图 17 V 形刀齿的运动

Fig. 17 Movement of V-shaped cutter

t——时间,s

V 形刀齿推拔点在 x 轴与 y 轴方向的分速度为

$$v_x = \mathrm{d}x/\mathrm{d}t = v_m - R\omega\sin(\omega t) \tag{3}$$

$$v_y = \mathrm{d}y/\mathrm{d}t = R\omega\cos(\omega t) \tag{4}$$

V 形刀齿推拔点绝对速度 v 为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_m^2 + R^2\omega^2 - 2v_m R\omega\sin(\omega t)} \tag{5}$$

(2)齿型推拔辊转速取值

V 形刀齿推拔点的圆周线速度 v_p 为

$$v_p = R\omega \tag{6}$$

令推拔速度比 λ 为

$$\lambda = v_p/v_m = R\omega/v_m = 2\pi nR/(60v_m) \tag{7}$$

式中 n——齿型推拔辊转速,r/min

由前文可知 R 为 230 ~ 300 mm,作业机组实际作业时测得前进速度 v_m 为 2.76 ~ 3.39 km/h,常用的速度比 λ 为 4 ~ 10[31],代入式(7)计算可得齿型推拔辊转速 n 为 97.66 ~ 391.16 r/min。由于 $\lambda > 1$,V 形刀齿的运动轨迹为余摆线,可保证 V 形刀齿有效向后推拔棉秆;齿型推拔辊作业时,V 形刀齿在棉秆主干底部推拔棉秆,开始推拔秆时 $v_x < 0$,所以整个推拔秆过程中 V 形刀齿上各推拔点的运动轨迹都是余摆线[32]。

3 田间试验

3.1 试验条件与材料

2020 年 3 月 28—29 日,在新疆维吾尔自治区阿拉尔市十二团 5 连机采棉棉田进行了密植棉秆对行铲拔铺放机的田间作业性能试验,试验条件见表 2。试验使用约翰迪尔 JDTN804 型拖拉机为动力,该机标定功率为 58.8 kW;试验时配置土壤坚实度仪、转速仪、秒表、角度尺、取样框(2 m × 2 m)、卷尺

表 2 试验条件

Tab. 2 Experimental conditions

参数	数值/类型
棉花品种	新陆中 70 号
棉花行距/cm	10 + 66 + 10 + 66 + 10
播种时采用穴播器穴数	13
棉秆株距/cm	10.4
理论株数/(株·hm^{-2})	253 155
单位平方米内棉秆株数	19.96
土壤类型	灌耕林灌草甸土(表层以轻壤、沙壤为主)[33]
宽行间土壤坚实度均值/kPa	2 752.06
窄行间土壤坚实度均值/kPa	1 796.05
棉秆高度平均值/mm	815.7
棉秆主干段含水率/%	15.97
棉秆中段含水率/%	12.46
棉秆顶端含水率/%	9.52

和工具箱等。

3.2　试验方法

性能测定参照文献[14]，本次性能试验取拔净率为评价指标。试验前根据棉秆主根长度范围为10.3～21.7 cm(地面以下)，调整对行铲切装置铲切深度为11.5 cm(该试验田棉秆主根直径在深度超过11.5 cm后，其以下部位直径变得越来越小)，齿型推拔辊旋转半径为245 mm，此时齿型板与棉秆主干底部作业点高度约为30 mm，测得铲倾角约为7.1°；每20 m长度作为一个测区，为保证拖拉机稳定运行、减少机组前进速度测试误差，拖拉机每次进入测区之前有10 m调整区来稳定拖拉机作业工况。棉秆对行铲拔铺放机田间试验现场如图18所示；试验重复3次，每次试验结束后在各测区内测出单位面积漏拔及拔断棉秆株数，计算棉秆拔净率、拔断率及漏拔率，计算公式为

$$\eta = \frac{A-(A_1+A_2)}{A}\times 100\% \tag{8}$$

$$\eta_1 = \frac{A_1}{A}\times 100\% \tag{9}$$

$$\eta_2 = \frac{A_2}{A}\times 100\% \tag{10}$$

式中　η——拔净率，%

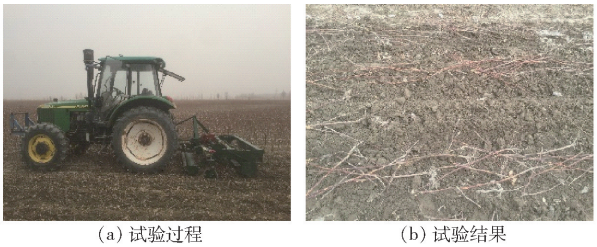
η_1——漏拔率，%

η_2——拔断率，%

A——棉秆总株数

A_1——漏拔的棉秆株数

A_2——拔断的棉秆株数



(a) 试验过程　　(b) 试验结果

图18　田间试验

Fig. 18　Photos of field trials

在每个测区测定一次作业时间，计算出机组前进速度，将计算结果取平均值作为最终试验结果，计算式为

$$v_m = S'/\Delta t \tag{11}$$

式中　S'——测区长度，取20 m

Δt——在测区内的作业时间，s

3.3　试验结果及分析

试验测定结果如表3所示。从表3可以看出，棉秆对行铲拔铺放机田间试验结果达到了技术指标要求(拔净率大于等于90%)，在试验过程中机组各部件工作平稳可靠，能一次性完成压秆、铲秆、拔秆、铺放等作业，而且具有分离泥土的功能。

表3　试验结果

Tab. 3　Test results

试验指标	挡位		技术指标
	低速1挡	低速2挡	
漏拔率/%	2.43	2.26	
拔断率/%	6.15	6.87	
拔净率/%	91.42	90.87	≥90
机组前进速度/(km·h^{-1})	2.76	3.39	
纯小时生产率/(hm^2·h^{-1})	0.63	0.77	

由于本次试验在春播前进行，棉秆含水率较低，导致棉秆韧性下降，若提高机组前进速度(高挡位工作)，发现压秆装置作业过程中易引起棉秆折断，所以性能试验中需选取低挡位作业；根据试验田种植的新陆中70号棉秆扎根深度范围10.3～21.7 cm，大多数棉秆主根在地下11.5 cm及以下时直径减小明显，主根径较细，因此确定对行铲切装置铲切深度约为11.5 cm，对应调整齿型推拔辊旋转半径为245 mm，此时齿型板作业点高度约为30 mm，测得铲倾角约为7.1°；机组低挡位作业时，测得前进速度为2.76～3.39 km/h、齿型推拔辊转速为156～174 r/min，实际作业转速在理论分析转速范围内(齿型推拔辊理论分析转速n为97.66～391.16 r/min)，推拔速度比$\lambda>1$，整个推拔秆过程中V形刀齿上各推拔点的运动轨迹都是余摆线；在以上试验条件下，拔净率为90.87%～91.42%，且整机工作平稳，作业效果较为理想。

试验在农一师十二团5连试验田进行，试验田的土壤条件和新疆大部分机采棉种植区的土壤条件类似，为沙壤土质[33]，可知该机在新疆棉区适应性较好。春播前进行棉秆铲拔作业，由于棉秆经过4～5个月的露天晾晒，棉秆含水率较低、韧性差，高速作业易导致棉秆拔断率增加，秋后棉花经采棉机采收后棉秆含水率较高、韧性好，此时该机组可采用高挡位作业，作业生产率将进一步提高。

4　结论

(1)设计了一种基于密植农艺的棉秆对行铲拔铺放机，该机主要由机架、三点悬挂架、动力传动系统、压秆装置、限深轮、对行铲切装置、铲切调节装置、齿型推拔辊、脱秆装置等组成，能够一次性完成压秆、棉秆对行铲切、铺放等作业，同时具有分离泥土的功能。

(2)通过分析计算确定了对行铲切装置、铲切调节装置和齿型推拔辊的结构参数，并完成了关键

部件的工作参数分析,确定对行铲切装置最小铲倾角为5°、铲切调节装置铲倾角范围为5.00°~8.95°、齿型推拔辊转速范围为97.66~391.16 r/min。田间试验表明,机组作业过程中铲切板无粘土现象,且对棉秆的抬升作用明显,齿型推拔辊和脱秆装置协同作业流畅,能将棉秆顺利推拔并铺放于田间。

(3)田间试验表明,调整机组使对行铲切装置铲切深度约为11.5 cm,此时对应铲倾角约为7.1°、齿型推拔辊旋转半径为245 mm;当机组前进速度2.76~3.39 km/h、齿型推拔辊转速156~174 r/min时,基于密植农艺的棉秆对行铲拔铺放机拔净率为90.87%~91.42%,生产率为0.63~0.77 hm^2/h,机组作业性能稳定,满足基于密植农艺的棉秆对行整秆铲拔作业要求。

参 考 文 献

[1] 李腾,郝付平,韩增德,等. 水平摘锭采棉理论分析与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):233-238.
LI Teng, HAO Fuping, HAN Zengde, et al. Theoretical analysis and experiment of picking cotton with horizontal spindle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):233-238. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s031&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.031. (in Chinese)

[2] 国家统计局. 国家统计局关于2019年棉花产量的公告[EB/OL]. [2019-12-17]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t2019 1217_1718007.html.

[3] 左旭,毕于运,王红彦,等. 中国棉秆资源量估算及其自然适宜性评价[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(6):159-166.
ZUO Xu, BI Yuyun, WANG Hongyan, et al. Estimation and suitability evaluation of cotton stalk resources in China[J]. China Population, Resources and Environment,2015,25(6):159-166. (in Chinese)

[4] 张枫叶,王伟,刘卫星,等. 我国棉花秸秆利用现状及前景分析[J]. 中国棉花,2016,43(8):21-23.
ZHANG Fengye, WANG Wei, LIU Weixing, et al. Utilization situation and prospect analysis of cotton-stalk in China[J]. China Cotton,2016,43(8):21-23. (in Chinese)

[5] AKDENIZ R C, ACAROGLU M, HEPBASLI A. Cotton stalk as a potential energy source[J]. Energy Source,2004,26(1):65-75.

[6] HAYKIR N I, BAKIR U. Ionic liquid pretreatment allows utilization of high substrate loadings in enzymatic hydrolysis of biomass to produce ethanol from cotton stalks[J]. Industrial Crops and Products,2013,51(6):408-414.

[7] 张宏喜,赵秀峰,魏玲,等. 棉杆水解制备木糖的研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(23):12687-12689.
ZHANG Hongxi, ZHAO Xiufeng, WEI Ling, et al. Preparing d-xylose from cotton stalk[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010,38(23):12687-12689. (in Chinese)

[8] 王贤华,邓勇,李允超,等. 棉秆炭吸附糠醛机理研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):208-213.
WANG Xianhua, DENG Yong, LI Yunchao, et al. Adsorption mechanism of furfural onto cotton stalk charcoals[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):208-213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/ view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150529&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.029. (in Chinese)

[9] 宋孝周,雷亚芳,傅峰. 棉秆重组方材制备工艺与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):164-168.
SONG Xiaozhou, LEI Yafang, FU Feng. Preparation technology and experiment of reconsolidated square materials of cotton stalk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):164-168. http://www.j-csam.org/jcsam /ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130529&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.029. (in Chinese)

[10] 贺小伟,刘金秀,李传峰,等. 我国棉秆机械收获技术现状分析及对策研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(3):19-25.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, LI Chuanfeng, et al. Current status and countermeasure research for cotton-stalk mechanical harvesting in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(3):19-25. (in Chinese)

[11] 宋占华,宋华鲁,耿爱军,等. 棉花秸秆双支撑切割性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(16):37-45.
SONG Zhanhua, SONG Hualu, GENG Aijun, et al. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(16):37-45. (in Chinese)

[12] 王锋德,陈志,董世平,等. 自走式棉秆联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(12):67-70.
WANG Fengde, CHEN Zhi, DONG Shiping, et al. Exploiture and experiment of self-walking cotton-stalk combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(12):67-70. (in Chinese)

[13] 张爱民,廖培旺,陈明江,等. 自走式不对行棉秆联合收获打捆机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2019,24(9):127-138.
ZHANG Aimin, LIAO Peiwang, CHEN Mingjiang, et al. Design and experiment of self-propelled non-aligned cotton stalk combined harvest baler[J]. Journal of China Agricultural University,2019,24(9):127-138. (in Chinese)

[14] 唐遵峰,韩增德,甘帮兴,等. 不对行棉秆拔取收获台设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(10):80-85.
TANG Zunfeng, HAN Zengde, GAN Bangxing, et al. Design and experiment on cotton stalk pulling head with regardless of row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(10):80-85. (in Chinese)

[15] 代振维,全腊珍,邹运梅,等. 小型履带自走式拔棉秆机的研制[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2015,35(5):

555 – 560.
DAI Zhenwei, QUAN Lazhen, ZOU Yunmei, et al. Development of small-type caterpillar self-propelled pull-out cotton stalk machine[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2015,35(5):555 – 560. (in Chinese)
[16] 王振伟. 不对行棉秆收获台的研究与设计[D]. 淄博:山东理工大学,2014.
WANG Zhenwei. The design and research on cotton stalk pulling head with regardless of row[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2014. (in Chinese)
[17] 郭振华,史建新,康秀生,等. 铲刀式拔棉秆机阻力分析[J]. 新疆农机化,2008,24(4):9 – 10,31.
[18] 王桂盛,贡献,陈胜达,等. 4MC – 4 型棉柴收获机的研制[J]. 粮油加工与食品机械,1999(6):23 – 25.
[19] 张佳喜,汪珽珏,陈明江,等. 齿盘式棉秆收获机的设计[J]. 农业工程学报,2019,35(15):1 – 8.
ZHANG Jiaxi, WANG Tingjue, CHEN Mingjiang, et al. Design of toothed disc cotton stalk harvester[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(15):1 – 8. (in Chinese)
[20] 陈明江,赵维松,王振伟,等. 齿盘式多行拔棉秆装置拔秆过程分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):109 – 120.
CHEN Mingjiang, ZHAO Weisong, WANG Zhenwei, et al. Operation process analysis and parameter optimization of dentate disc cotton stalk uprooting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):109 – 120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190311&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.011. (in Chinese)
[21] 李怡. 棉秆起拔机关键部件设计与试验研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2014.
LI Yi. Design and experimental study on key components of cotton stalks pulling machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
[22] 花俊国. 浮压双链夹持式拔棉秆机的研究[J]. 河南农业大学学报, 2006,40(5):549 – 552.
HUA Junguo. Study on floating double-chain tongs cotton-stalk puller [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2006, 40(5):549 – 552. (in Chinese)
[23] 贾健. 拔棉柴机的设计研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2005,25(3):268 – 269,274.
JIA Jian. Design on machines of dialing cotton stem[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2005,25(3):268 – 269,274. (in Chinese)
[24] 营雨琨,曹肆林,王敏,等. 对辊式棉秆起拔装置的设计及试验[J]. 新疆农垦科技,2018,41(8):22 – 24.
[25] 武建设,陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报,2015,31(18):5 – 10.
WU Jianshe, CHEN Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang Production and Construction Corps[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(18):5 – 10. (in Chinese)
[26] 杨培,陈振,阿不都卡地尔·库尔班,等. 对等密度条件下机采棉不同种植模式的综合评价[J]. 新疆农业科学,2019,56(4):599 – 609.
YANG Pei, CHEN Zhen, KUERBAN·Abudukadier, et al. Comprehensive evaluation of different planting modes of machine-picked cotton under the equal density condition[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2019,56(4):599 – 609. (in Chinese)
[27] 贺小伟,刘金秀,李传峰,等. 机采棉密植棉秆对行铲拔铺条机的设计与有限元分析[J]. 塔里木大学学报,2019,31(2):71 – 77.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, LI Chuanfeng, et al. Design and finite element analysis of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks with close planting and machine-harvested cotton[J]. Journal of Tarim University,2019,31(2):71 – 77. (in Chinese)
[28] 贺小伟,刘金秀,王龙,等. 密植棉秆对行起拔铺放机的设计与运动仿真[J]. 中国农机化学报,2020,41(1):6 – 11.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, WANG Long, et al. Design and motion simulation of row-controlled drawing and placing machine for cotton-straws close planting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(1):6 – 11. (in Chinese)
[29] 武广伟,宋建农,李永磊,等. 草地振动式间隔松土机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(2):42 – 46,41.
WU Guangwei, SONG Jiannong, LI Yonglei, et al. Design and experiment on vibration spacing scarifier for meadow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(2):42 – 46,41. (in Chinese)
[30] 贾洪雷,汲文峰,韩伟峰,等. 旋耕–碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):45 – 50.
JIA Honglei, JI Wenfeng, HAN Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(7):45 – 50. (in Chinese)
[31] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
[32] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[33] 新疆生产建设兵团农一师土壤普查办公室. 农一师土壤[M]. 新疆生产建设兵团:阿克苏农一师印刷厂,1985.