

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.006

玉米垄作随动自调刃口角被动圆盘式破茬刀设计与试验

王加一 赵淑红 高连龙 袁溢文 杨悦乾

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对耕整地机械和免耕播种机上被动圆盘式破茬刀切割根茬和土壤时耕作阻力大、耗油量高以及破茬比率低的问题,设计了一种随动自调刃口角破茬刀。该自调破茬刀设有缓冲机构,能够根据不同深度根茬和土壤特性调整刃口角度实现低阻力、深进给切割。通过对试验地的多点土壤贯入阻力(土壤与根土结合体)测量以及土壤、根茬摩擦角测量,并结合理论分析与计算机辅助设计,确定所设计的自调破茬刀缓冲机构弹簧的劲度系数为42 N/mm,以此为主要参数设计了自调破茬刀。田间高速摄像验证试验得到,当自调破茬刀深度为25 mm时,弹簧形变量与理论设计值相差6.9%,深度为75 mm时,弹簧形变量与理论设计值相差7.3%。且高速摄像结果显示自调破茬刀切割根茬和土壤性能优良以及缓冲机构可行,验证了设计思路的合理性与可行性。田间对比试验得到,所设计的自调破茬刀相对于圆盘刀和缺口圆盘刀,耕作阻力降低了13.3%和20.6%,耗油量降低了19.3%和35.3%,破茬比率提高了16.1%和4.6%,表明所设计的随动自调刃口角破茬刀作业性能与效果较优。

关键词: 玉米垄作; 自调破茬刀; 缓冲机构; 耕作阻力; 耗油量

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0059-09

OSID:



Design and Experiment of Passive Disc Cutting Blade in Corn Ridges

WANG Jiayi ZHAO Shuhong GAO Lianlong YUAN Yiwen YANG Yueqian

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: A kind of stubble cutter was designed for cutting stubble and soil by ploughing machinery and no-tillage planter, which had the disadvantages of high resistance, high oil consumption and the impact of soil block on the cutting tool during the operation of stubble cutter. The self-regulating stubble cutter was provided with a buffer mechanism, which could adjust the cutting edge angle according to different depths of the stubble and soil characteristics to achieve low resistance and deep feed cutting. By measuring the penetration resistance of multi-point soil (soil and root soil) and the friction angle of soil and stubble, and combining with theoretical analysis and computer aided design, it was determined that the stiffness coefficient of spring of buffer mechanism of the self-regulating stubble cutter was 42 N/mm. Then taking this as the main parameter and the self-regulating stubble cutter was designed. When the depth of the self-regulating stubble cutter was 25 mm, the difference between the spring variable and the theoretical design value was 6.9%, and when the depth was 75 mm, the difference between spring variable and theoretical design value was 7.3%. And the high speed camera showed that the performance of cutting stubble and soil of the self-regulating stubble cutter were good and the buffer mechanism was feasible, so the rationality and feasibility of the design idea were verified by both. Compared with disc cutter and notch cutter, the tillage resistance of the self-regulating stubble cutter was decreased by 13.3% and 20.6%, the oil consumption of the self-regulating stubble cutter was decreased by 19.3% and 35.3%, and the stubble breaking ratio of the self-regulating stubble cutter was increased by 16.1% and 4.6%, respectively. Therefore, the performance and work effect of the designed self-regulating stubble cutter were good.

Key words: corn ridge; self-regulating stubble cutter; buffer mechanism; tillage resistance; oil consumption

收稿日期: 2020-11-12 修回日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000903)和黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA19B101)

作者简介: 王加一(1993—),男,博士生,主要从事保护性耕作触土部件力学特性研究,E-mail: 15546029526@163.com

通信作者: 赵淑红(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事田间农业机械及力学特性研究,E-mail: shzh091@sina.com

0 引言

破茬刀是耕整地机械和免耕播种机核心部件之一^[1-3],位于机具的前端,切割根茬和土壤,为机具的通过性增加保障^[4-5],因此破茬作业在耕整和播种作业中强度最大,其产生的耕作阻力大,附带的发动机功耗也较高。

21世纪初,保护性耕作下平面圆盘^[6-7]、缺口圆盘^[8-10]、波纹圆盘^[11-12]等技术逐渐被提出。近年来,动态减阻^[13-14]、仿生减阻^[14-16]、结构设计减阻^[17-19]等方法得到研究,减阻方法应用于破茬刀中能够降低耕作阻力。但现有的圆盘式破茬刀结构固定,降低耕作阻力的同时存在滑推现象,致使破茬比

率较低。

本文针对耕整地机械和免耕播种机上应用的被动圆盘式破茬刀存在的问题,设计一种随动自调刃口角破茬刀(自调破茬刀)。其应用环境为秸秆粉碎还田下的玉米垄作免耕地,在作业过程中根据刀片不同位置的受力差异性,触动缓冲机构,从而调整切割角度,降低耕作阻力,增强作业效果,从而保证机具的性能。通过仿真试验与田间试验对设计结果和作业性能进行测试验证。

1 破茬刀结构与作业原理

设计的自调破茬刀主要由刀盘、6片刀片和缓冲机构组成,主要结构和作业原理如图1所示。

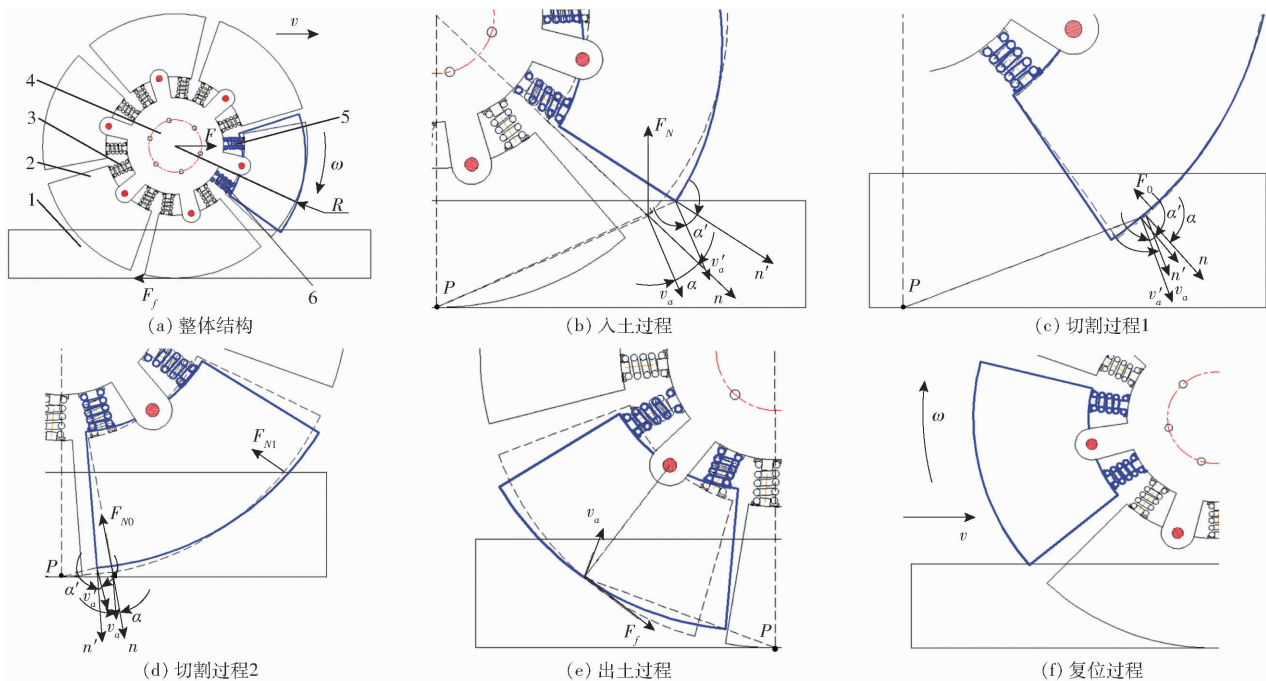


图1 自调破茬刀整体结构与作业原理图

Fig. 1 Overall structure and operation principle of self-regulating stubble cutter

1. 土壤和根茬 2. 刀片 3. 缓冲机构 4. 刀盘 5. 弹簧1 6. 弹簧2

所设计的自调破茬刀为被动式,其作业主要分为入土过程、切割过程、出土过程和复位过程。设 v 为机具前进速度,则破茬刀在牵引力 F 和摩擦阻力 F_f 作用下,形成一对力偶,使破茬刀被动旋转, ω 为其旋转角速度, R 为自调破茬刀半径。则自调破茬刀在入土过程中(图1b),主要受到土壤或根茬的支持力 F_N 作用,破茬刀片绕销轴逆时针转动,使弹簧1压缩,弹簧2拉伸。刀片的滑切角由 α 变为 α' ,前者相比后者滑切角增大,因此在入土过程中阻力降低。

切割过程中,自调破茬刀刀口法线顺时针转动,当入土较浅时(图1c),与刀片速度之间的夹角逐渐缩小,即滑切角减小,滑移量减小,增加切割进给量^[20],增加切割效果。当入土较深时,自调破茬刀刀口法线方向

转过刀片速度方向(图1d),且由于随刀片入土深度增加,土壤贯入阻力增大,因此 F_{N0} 明显大于 F_{N1} ,故弹簧1拉伸,弹簧2压缩,刀片绕销顺时针旋转, α' 相比于 α 在逐渐增大,此时滑切角增大,降低切割阻力。

出土过程中(图1e),刀片的运动方向为前上方,不涉及切割土壤和根茬,刀片仅在摩擦阻力 F_f 作用下使弹簧1压缩,弹簧2拉伸,刀片旋转,降低力对机具的扭矩,从而保护机具,降低机具的变形量。

刀片出土后自动复位(图1f),保证旋转中的弧度,准备下一入土过程。

2 自调破茬刀设计

2.1 破茬刀切割根茬分析

将玉米根茬视为一质点 M (质量为 m),对破茬

刀切割根茬时进行受力分析,如图 2 所示。其中 n 轴为破茬刀切割根茬时的法向, t 轴为破茬刀切割根茬时的切向, F_n 为法向力, F_t 为切向力, a_e 为牵连加速度, a_c 为科氏加速度, a_r^n 为法向相对加速度, a_r^t 为切向相对加速度。

在 n 轴和 t 轴方向上建立动力学方程

$$F_n - F_f \cos \alpha = m(a_e - a_r^n - a_e \sin \alpha) \quad (1)$$

$$F_t - F_f \sin \alpha = m(a_e \cos \alpha - a_r^t) \quad (2)$$

其中 $F_t = F_n \tan \varphi \quad (3)$

式中 φ ——根茬与破茬刀之间的滑动摩擦角, ($^\circ$)

联立公式(1)~(3)得到

$$F_n \tan \varphi (\tan \alpha - \tan \varphi) - m a_e \tan \alpha + m a_r^n \tan \alpha + m a_e \cos \alpha + m a_e \sin \alpha \tan \alpha = m a_r^t \quad (4)$$

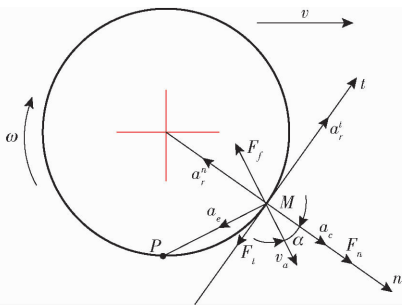


图 2 破茬刀切割根茬原理图

Fig. 2 Principle of cutting stubble with stubble cutter

破茬刀切割根茬时,为了降低耕作,应产生切向相对加速度 a_r^t ,在滑动摩擦角 φ 、根茬质量 m 、法向力 F_n 和工作参数(牵连加速度 a_e 、科氏加速度 a_c 以及法向相对加速度 a_r^n)一定时,应该控制破茬刀的滑切角 α 。由公式(4)得,当 α 越大时,越容易产生 a_r^t ,但 α 过大时易产生滑移,降低切割效果。故应设计破茬刀结构,使破茬刀在作业过程中变化 n 轴,从而改变 α 。

传统耕整地机械和免耕播种机上应用的被动圆盘式破茬刀主要为平面圆盘刀和缺口破茬刀^[19],其刀片结构为固定的圆形,以平面圆盘刀为例进行分析,如图 3 所示。

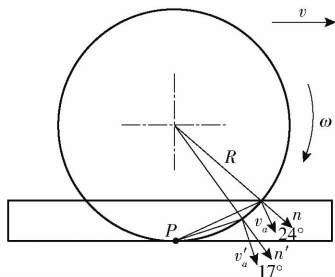


图 3 平面圆盘刀结构示意图

Fig. 3 Schematic of flat disc knife structure

当圆盘刀半径为 230 mm,入土深度为 80 mm 时,选取任意两位置对滑切角进行测量,分别为 24°

和 17° ,由此可得,随入土深度的增加,圆盘刀滑切角由 24° 逐渐减小到 0° ,结合地表根茬的滑切角为 $16.7^\circ \sim 22.4^\circ$ ^[21]。因此当圆盘刀与根茬接触时,会产生滑移作用,降低破茬比率;随入土深度的增加,滑切角减小,耕作阻力增加,若能对此过程中的滑切角进行调节,将会改变耕作阻力。

2.2 缓冲机构设计

本文所设计的自调破茬刀采用圆盘形式,刀片厚度设计为 4 mm。为了降低自调破茬刀在作业过程中的耕作阻力,增强切割性能,同时降低自调破茬刀受扭矩时机具的变形量,在刀盘和刀片之间设计缓冲机构。

2.2.1 土壤贯入阻力的测量

在土壤耕作层内,随着自调破茬刀入土深度的增加,土壤贯入阻力在逐渐增大,且刀片偏离中心线的距离在逐渐减小,因此刀片受到力的作用在缓冲机构上更为明显。为设计与此作业过程相对应的缓冲机构,需对土壤贯入阻力进行测量。

试验条件:测试试验于 2019 年 10 月 20 日在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学校内试验地进行。试验地为玉米垄作地,土壤平均含水率 $(19 \pm 1)\%$,根茬平均含水率为 181.7% (干含水率),试验地面积为 0.27 hm^2 ,土壤为东北黑壤土。所用试验仪器为 SC-900 型土壤硬度仪(北京沃特兰德科技有限公司)。

测试方法:测试方法参照文献[22],本次试验对垄台进行测试,首先将平面铝板随机放置在垄台上。然后将硬度计以均匀的速度通过铝板上的圆孔插入土壤中,速度小于 182 cm/min 。在插入过程中,数据每 25 mm 由硬度计自动存储一次。对试验田进行多点测试,测试点包含根茬与根茬间的土壤部分以及根茬周围的根土结合体部分,共计测试 120 次,取 0、25、50、75 mm 处平均值作为测试结果。试验场地和操作如图 4 所示。



(a) 试验地

(b) 硬度仪插入土壤过程

图 4 土壤贯入阻力测试

Fig. 4 Soil penetration resistance test

试验结果:对数据进行剔除,土壤贯入阻力随土壤深度变化如图 5 所示。

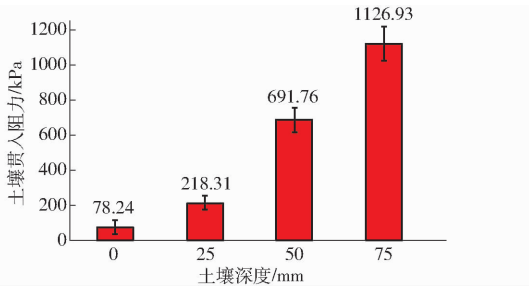


图5 土壤贯入阻力测试结果

Fig. 5 Soil penetration resistance test results

由图5可以得到,在0~75 mm内,土壤贯入阻力随土壤深度的增加显著性增加,故在自调破茬刀入土深度变化时缓冲机构受力状态不同。

2.2.2 缓冲机构分析与设计

由于土壤贯入阻力随土壤深度的变化差异

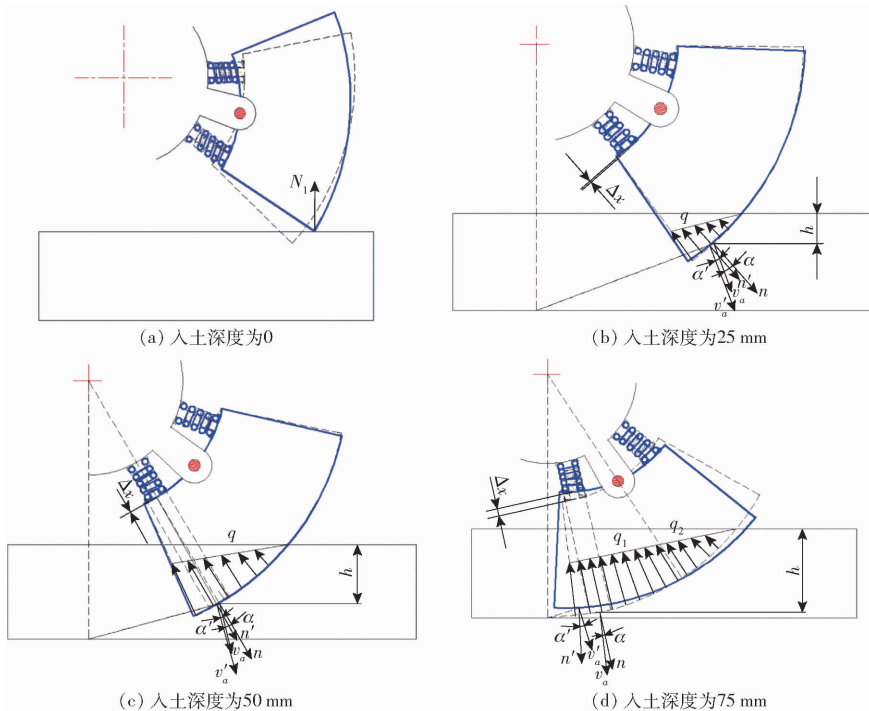


图6 自调破茬刀作业过程分析

Fig. 6 Process analysis of self-regulating stubble cutter

当入土深度 h 为 25 mm 时,受力状态如图 6b 所示, q 为自调破茬刀入土位置所对应的载荷(大小等于土壤贯入阻力),其所产生的力为支持力,弹簧变形后的形变量为 Δx ,满足

$$N_1 = qA \quad (5)$$

$$N_1 = k\Delta x \quad (6)$$

式中 N_1 ——自调破茬刀所受的支持力, N

A ——有效受力面积, mm^2

k ——弹簧劲度系数, N/mm

入土深度为 25 mm 时,结合 2.1 节对破茬刀切割根茬时的受力分析,为降低耕作阻力同时保证较强的切割能力(无滑移),综合考虑滑切角的

明显,因此自调破茬刀在作业过程中缓冲机构受力变化较大。依据土壤贯入阻力的测试数据,结合破茬刀入土深度,本文主要对破茬刀入土深度为 0 以及弹簧中心线在刃口上的对应点入土深度为 25、50、75 mm 时进行分析。

当自调破茬刀入土深度为 0 时,受力状态如图 6a 所示,此时刀片为点接触,不涉及刀片刃口曲线受力,添加缓冲机构使刀片绕销轴逆时针旋转,图 2 中的 n 轴逆时针旋转,增大滑切角,降低耕作阻力,并带动缓冲机构拉伸与压缩,此时平均土壤贯入阻力为 78.24 kPa,因此此时弹簧的拉伸与压缩未达到弹簧的极限,仅要求弹簧的强度满足支撑条件,不对入土深度为 0 时的弹簧进行求解。

设计范围,将滑切角控制为小于此时的土壤和根茬摩擦角^[21],因此需要对土壤和根茬的摩擦角进行测定,由于整个人土过程都需要依据土壤和根茬摩擦角对弹簧的极限位置进行限定,故对 25、50、75 mm 处的土壤与根茬滑动摩擦角进行测定,测定方法同文献[23-24],以平均值作为最后的测定结果,测定过程如图 7 所示,测定结果如表 1 所示。

对入土深度为 25 mm 进行计算,将 25 mm 深度周围的载荷平均值理想化为 25 mm 处土壤贯入阻力(下同),有效受力面积的计算方法为

$$A = ld \quad (7)$$



图 7 根茬与土壤滑动摩擦角测定装置

Fig. 7 Device for measuring sliding friction angle of root stubble and soil

表 1 根茬与土壤滑动摩擦角测定结果

Tab. 1 Measurement result of sliding friction angle of stubble and soil

深度/mm	物料	根茬含水率/%	土壤含水率/%	滑动摩擦角/(°)
25 ± 5	根茬 + 土壤	134.6	18.7	19.8
50 ± 5	根茬 + 土壤	171.1	20.3	24.1
75 ± 5	根茬 + 土壤	192.3	21.1	27.3

其中 $l = R\theta$ (8)

式中 l ——刃口弧长, mm

θ ——入土部分刃口所对应的圆心角, rad

d ——刀片厚度, mm

结合计算机辅助设计软件 AuCAD 2007 的标注功能, 得到刀片在支持力方向上的有效受力面积为 227.69 mm^2 , 结合图 5 中土壤深度为 25 mm 时的土壤贯入阻力, 由式(5)进行计算得到 N_1 为 49.7 N。若控制滑切角 α 为 19° , 结合 AuCAD 2007 软件, 得到 Δx 为 1.16 mm, 结合公式(6)得到, 滑切角小于此时的土壤和根茬摩擦角时, 需要保证 $k \leq 42.84 \text{ N/mm}$, 此时能够使图 2 中的 n 轴顺时针旋转, 但绝对速度方向改变, 滑切角减小, 实现无滑移切割。

当入土深度为 50 mm 时, 如图 6c 所示, 计算得到在支持力方向上的有效受力面积为 397.31 mm^2 , 结合图 5 中土壤深度为 50 mm 时的土壤贯入阻力进行计算, 得到 N_1 为 274.85 N。此时滑切角为 16° , 远小于表 1 中的 24.1° , 能保证无滑移切割, 但滑切角减小较多时会增加耕作阻力, 故弹簧微压缩即可, 此时若滑切角减小 2° , 弹簧形变量 Δx 为 0.72 mm, 对于劲度系数 k 无上限要求, 此时与 25 mm 深度切割原理相同。

当入土深度为 75 mm 时, 如图 6d 所示, 此时自调破茬刀刃口的载荷对弹簧 1 和弹簧 2 均有压力, 但弹簧 2 压力更大, 故弹簧 2 压缩、弹簧 1 拉伸, 设 q_1 经刀片对弹簧 2 作用, q_2 经刀片对弹簧 1 作用, 计算得到 q_1 和 q_2 在支持力方向上的有效受力面积分别为 409.54 、 264.37 mm^2 , 结合图 5 中土壤深度为 75 mm 和 25 mm 时的土壤贯入阻力进行计算, 得到 N_1 为 403.81 N(两者做差)。若为了降低耕作阻力,

需要增大此时的滑切角, 结合 AuCAD 2007 软件得到弹簧此时的最大形变量 Δx 为 6.6 mm, 因此要求 $k \leq 61.18 \text{ N/mm}$, 此时能够使图 2 中的 n 轴顺时针旋转, 绝对速度方向改变较小, 滑切角增大, 增强滑切效果, 降低耕作阻力。

综上, 当入土深度为 25 mm 时, 计算值误差较小; 当入土深度为 50 mm 时, 计算得到的支持力偏大, 但此时弹簧满足支撑强度; 当入土深度为 75 mm 时, 计算得到的支持力偏大, k 值偏大。

结合文献[25-26]中根茬的剪切试验得到, 当刀片以 200 mm/min 的速度切割根茬时, 最大剪切力为 242 N, 刀片运动速度越快, 最大剪切力越小, 本文所设计破茬刀刃口线速度远大于 200 mm/min, 故将 k 设计为 42 N/mm, 弹簧达到最大压缩量 6.6 mm 时, 所施加的力大于 242 N, 能够切断根茬。材料为 65Mn 钢, 淬火处理。

依据文献[25], 根茬极限剪切力为 195.78 N, 本文设计弹簧 k 为 42 N/mm, 最大形变量 Δx 为 6.6 mm, 故自调破茬刀可以施加 277.2 N 的剪切力, 能够切断根茬。

2.3 刀盘与刀片设计

为了安装刀片且方便加工(刀盘与刀片铰接), 将刀盘设计为 3 层, 每层厚度为 4 mm, 刀盘与刀片连接处留有空间。所设计的刀盘材料为 65Mn 钢, 工程图如图 8 所示。

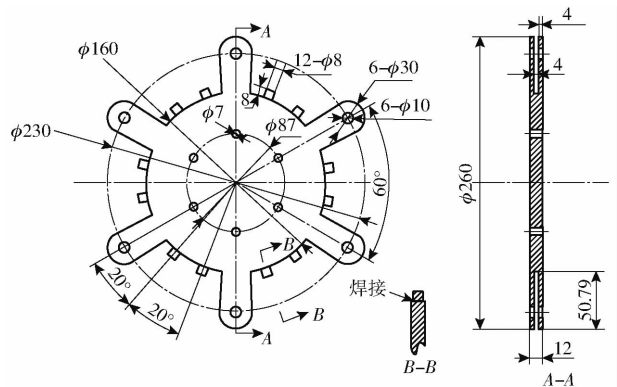


图 8 破茬刀刀盘工程图

Fig. 8 Two-dimensional diagram of stubble cutter

刀片设计为 6 片, 每片刀片留有铰接孔。基于 2.1.2 节中的分析, 为了保证刀片绕铰接孔的最大转角(在弹簧压缩过程中刀片不干涉), 同时在作业过程中不存在漏切(刀片在入土后弹簧压缩使刀片间的间隙减小), 结合 AuCAD 2007 软件, 限制压缩的极限位置, 最终每片刀片所对应的圆心角为 53.8° , 刀片与刀片间的间隙所对应的圆心角为 6.2° , 间隙变换原理图如图 9a 所示, 整个破茬刀实物图如图 9b 所示, 材料为 65Mn 钢。

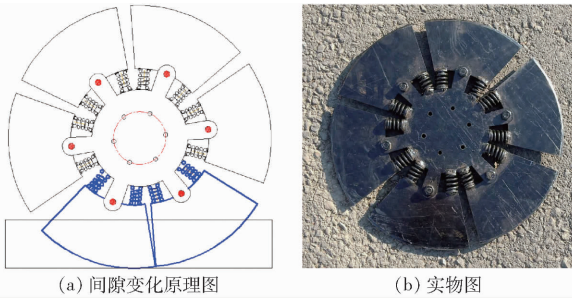


图9 自调破茬刀

Fig. 9 Self-regulating stubble cutter

3 验证试验

3.1 试验条件与设备

本次试验于2020年10月26日在东北农业大学校内试验地进行,试验地为玉米垄作地,垄间距为650 mm,试验地面积为0.27 hm²,平均根茬分布为3~4个/m,试验地80 mm以内耕层的平均土壤含水率为(20±1)%,根茬平均含水率为184.3%(干含水率),试验所用设备为奔野454型拖拉机(宁波奔野拖拉机汽车制造有限公司)、机架、自调破茬刀、计算机、高速摄像机(美国阿美特克有限公司)、直流电源、逆变器等,如图10所示。

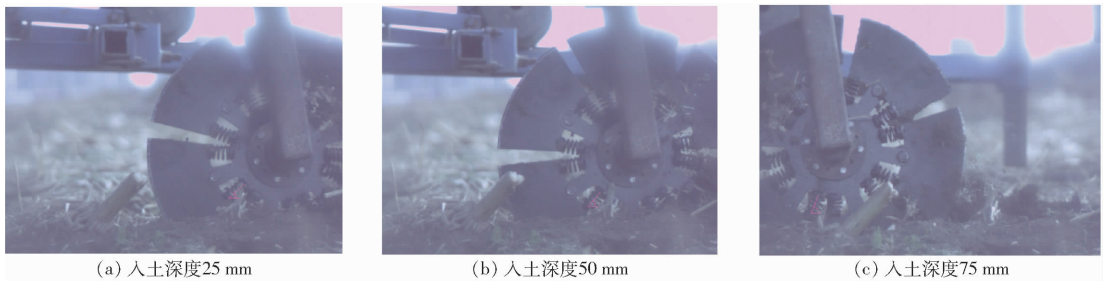


图11 高速摄像结果

Fig. 11 High speed camera results

与2.2.1节中设计的理论值相比,当自调破茬刀深度为25 mm时,弹簧形变量相差6.9%,相差较小,且刀片与理论设计中的调整趋势相同;当自调破茬刀深度为50 mm时,弹簧形变量较大,不能实现微调,此时滑切角减小,增强切割能力;当自调破茬刀深度为75 mm时,弹簧形变量相差7.3%,弹簧压缩,滑切角增大,降低切割阻力。以上3种深度均无滑移,存在滑切,且刀片运动趋势与理论设计一致,试验结果中未发现漏切现象,故本试验结果验证了设计思路的合理性、自调破茬刀切割土壤和根茬的优良性以及缓冲机构的可行性。

4 对比试验

为对比所设计的自调破茬刀与传统常用破茬刀的作业性能与作业效果,进行大田试验。



图10 田间高速摄像试验

Fig. 10 High speed camera of field test

1. 逆变器(12 V 转换 220 V, 直流转换交流) 2. 高速摄像机 3. 计算机 4. 奔野454型拖拉机 5. 机架 6. 自调破茬刀

3.2 试验方法

对自调破茬刀切割根茬和土壤时进行分析,随机选取试验地内5处根茬,摆设并调整高速摄像机位,拖拉机带动机架和自调破茬刀正常作业时,对破茬过程中自调破茬刀的运动状态进行拍摄,记录并保存。

3.3 试验结果

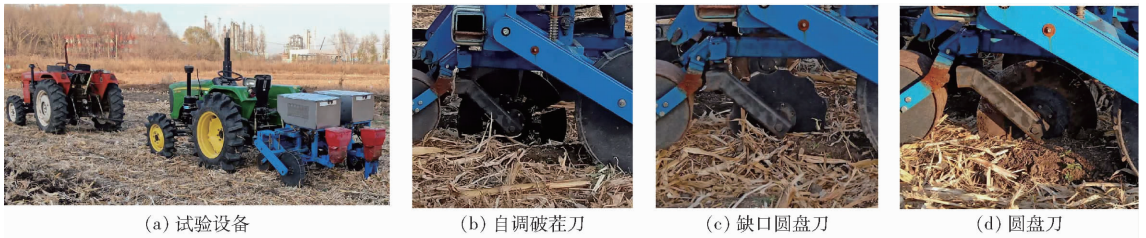
在Phantom 2.8软件中对所拍摄的视频进行分析,结果如图11所示,并对摄像结果中的弹簧形变量进行提取,入土深度为25、50、75 mm时分别为1.08、3.89、6.12 mm。

4.1 试验设备

试验时间为2020年10月28日—11月2日,试验条件与3.1节中相同。试验设备为奔野454型拖拉机(宁波奔野拖拉机汽车制造有限公司)、约翰迪尔354型拖拉机、2BM-2型免耕播种机、自调破茬刀、圆盘刀、缺口圆盘刀、GPS-10A型机动车多功能检测仪等,如图12所示。

4.2 试验方案

将所设计自调破茬刀与常用的圆盘刀、缺口圆盘刀进行对比,对比因素为作业速度(拖拉机作业中常用挡位:慢2挡、慢3挡、快1挡和快2挡,均为手动杆三分之一油量),试验指标为耕作阻力、耗油量(采用前拖拉机牵引后拖拉机悬挂的方式测试)和破茬比率。由于播种机为双行作业(被测部件安装于左侧单体,右侧单体安装圆盘刀来平衡耕作阻力),试验指标耕作阻力和耗油量的测试方法为:测



(a) 试验设备

(b) 自调破茬刀

(c) 缺口圆盘刀

(d) 圆盘刀

图 12 田间对比试验

Fig. 12 Field contrast test

出两部件不工作时的示数 Y 、被测部件与平衡部件平均工作时的示数 Y_1 以及两平衡部件工作时的示数 Y_2 。则被测部件的示数 Y_0 为

$$Y_0 = Y_1 - \frac{Y + Y_2}{2} \quad (9)$$

将每个试验区划分为 10 m 的测试区和 5 m 的准备区, 机具在试验准备区达到速度平稳后进入试验区^[19], 每次试验重复 3 次, 以平均值为每次试验的评价标准, 耗油量的结果为每作业 10 m 的

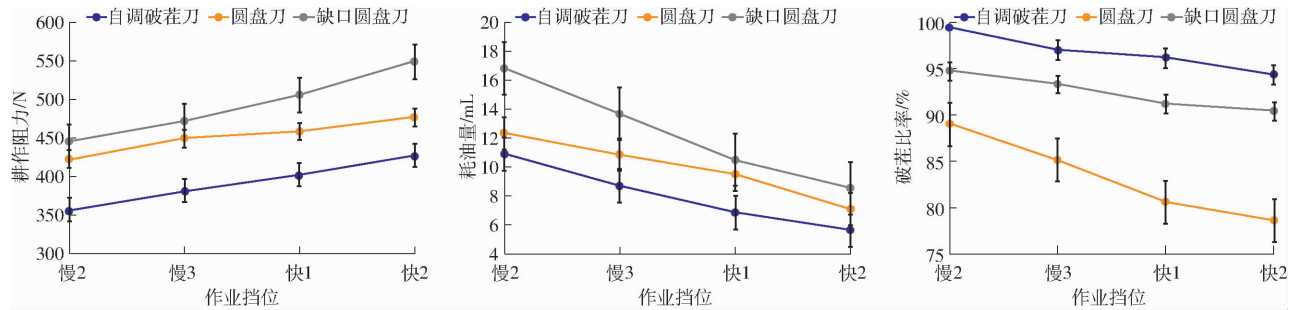


图 13 对比试验结果

Fig. 13 Results of contrast test

各挡位下的平均破茬比率为 96.8%, 优于缺口圆盘刀的 92.5%, 缺口圆盘刀优于圆盘刀的 83.4%。所设计的自调破茬刀相对于圆盘刀和缺口圆盘刀, 耕作阻力降低了 13.3% 和 20.6%, 耗油量降低了 19.3% 和 35.3%, 破茬比率提高了 16.1% 和 4.6%。

随作业速度的增加, 各破茬刀的耕作阻力增加; 各破茬刀的耗油量降低。耕作阻力增加而耗油量降低的原因是通过相同 10 m 路程时, 速度大时时间缩短, 发动机工作时间变短, 故耗油量降低; 各破茬刀的破茬比率降低, 原因是速度增加, 切割时间缩短, 因此切割效果不佳, 破茬比率降低。

5 结论

(1) 提出一种随耕深变化刃口自动调节式破茬

耗油量, 耕作阻力的结果为作业 10 m 过程的平均值。

破茬比率的测试方法同文献[19]。

4.3 试验结果与分析

试验结果如图 13 所示。由图 13 可以得到, 所设计的自调破茬刀在各挡位下的平均耕作阻力和耗油量为 391.86 N、8.03 mL, 优于圆盘刀的 452.08 N、9.95 mL, 圆盘刀优于缺口圆盘刀的 493.43 N、12.41 mL; 在破茬比率方面, 所设计的自调破茬刀在

刀, 该破茬刀能够实现降低耕作阻力与耗油量、增强破茬效果。

(2) 通过对根茬的受力分析与计算机辅助设计, 并结合试验地的土壤贯入阻力与土壤、根茬摩擦角测量, 确定所设计的自调破茬刀缓冲机构弹簧的劲度系数为 42 N/mm, 并设计了自调破茬刀。

(3) 田间高速摄像试验得到当自调破茬刀深度为 25 mm 时, 弹簧形变量与理论设计值相差 6.9%, 深度为 75 mm 时, 弹簧形变量与理论设计值相差 7.3%。且高速摄像拍到自调破茬刀切割土壤和根茬性能优良以及缓冲机构可行。

(4) 通过田间对比试验得到, 所设计的自调破茬刀相对于圆盘刀和缺口圆盘刀, 耕作阻力降低了 13.3% 和 20.6%, 耗油量降低了 19.3% 和 35.3%, 破茬比率提高了 16.1% 和 4.6%。

参 考 文 献

[1] 贾洪雷, 郭明卓, 郭春江, 等. 免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 103-114.

JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of

- parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 103 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181012&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.012. (in Chinese)
- [2] 白晓虎,林静,吕长义,等. 免耕播种机圆盘破茬刀工作性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(15):1-9.
BAI Xiaohu, LIN Jing, LÜ Changyi, et al. Analysis and experiment on working performance of disc coultter for no-tillage seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 1 - 9. (in Chinese)
- [3] 郭明卓. 基于动态仿生的破茬深松联合作业机设计及关键技术研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
GUO Mingzhuo. Design and key technology research of stubble breaking and subsoiling combined machine based on dynamic bionics[D]. Changchun: Jinlin University, 2019. (in Chinese)
- [4] CHANG Zhiyong, LIU Wei, TONG Jin, et al. Design and experiments of biomimetic stubble cutter[J]. Journal of Bionic Engineering, 2016, 13(2): 335 - 343.
- [5] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
- [6] MEHMET Z M, AHMET C. Row crop planter attachments in a conservation tillage system; a comparative study[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98(1): 27 - 34.
- [7] FALLAHI S, RAPUFAT M H. Disc angle and tilt angle effects on forces acting on a single-disc type no-till seeder opener[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 194(6): 104304.
- [8] 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺旋型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):118-124.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on archimedes spiral type of gap cutting disc[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014 45(6):118 - 124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140619&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.019. (in Chinese)
- [9] 黄玉祥,高鹏洋,张庆凯,等. 免耕播种机切茬导草组合式草土分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5):67-78.
HUANG Yuxiang, GAO Pengyang, ZHANG Qingkai, et al. Design and experiment of grass-soil separation device with combination of stubble cutting and grass guiding used for no-till planter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 67 - 78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200507&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.007. (in Chinese)
- [10] TOROTWA I, DING Qishuo, MAKANGE N R et al. Performance evaluation of a biomimetically designed disc for dense-straw mulched conservation tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 212(5): 105068.
- [11] 赵旭,张祖立,唐萍,等. 被动式倾斜波纹圆盘破茬刀工作性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(1):64-67.
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, TANG Ping, et al. Behavior of passive stubble-cutting disc with oblique ripples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 64 - 67. (in Chinese)
- [12] 朱瑞祥,李成鑫,程阳,等. 被动式圆盘刀作业性能优化试验[J]. 农业工程学报,2014,30(18):47-54.
ZHU Ruixiang, LI Chengxin, CHENG Yang, et al. Working performance of passive disc coultter [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 47 - 54. (in Chinese)
- [13] 袁军,于建群. 基于DEM-MBD耦合算法的自激振动深松机仿真分析[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):17-24.
YUAN Jun, YU Jianqun. Analysis on operational process of self-excited vibrating subsoiler based on DEM - MBD coupling algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Suppl. 1): 17 - 24. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2020s103&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.003. (in Chinese)
- [14] 蒋锐,陈阳,于成信,等. 仿蟋蟀切齿叶减阻灭茬刀片设计与试验[J]. 工程设计学报,2018,25(4):409-419.
JIANG Rui, CHEN Yang, YU Chengxin, et al. Design and experiment of cricket's incisor lobe inspired stbble cutting blade with drag reduction[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 25(4): 409 - 419. (in Chinese)
- [15] 张金波,佟金,马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):141-145.
ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141 - 145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140422&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022. (in Chinese)
- [16] 贾洪雷,孟凡豪,刘立晶,等. 芯铧式开沟器仿生设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(4):44-49,77.
JIA Honglei, MENG Fanhao, LIU Lijing, et al. Biomimetic design and experiment of core-share furrow opener [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 44 - 49, 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200405&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.

- 04.005. (in Chinese)
- [17] 杨帆,李问盈,李洪文,等. 免耕播种机缺口圆盘刀有限元静强度分析[J]. 农业机械学报,2010,41(6):53-55.
YANG Fan, LI Wenying, LI Hongwen, et al. Analysis for gap disc of no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 53-55. (in Chinese)
- [18] 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): 132-140.
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.): 132-140. 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)
- [19] 赵淑红,王加一,杨超,等. 保护性耕作破茬碎土刀设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):57-68.
ZHAO Shuhong, WANG Jiayi, YANG Chao, et al. Design and experiment of stubble chopper under conservation tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 57-68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190907&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.007. (in Chinese)
- [20] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报,1982,6(1):64-69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982, 6(1): 64-69. (in Chinese)
- [21] 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 CSAE, 2011, 27(12): 13-17. (in Chinese)
- [22] 谭贺文. 一种组合式播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
TAN Hewen. Design and experiment of a combined seeding furrow opener[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [23] 陈君执. 玉米精量播种机V型槽拨轮式导种部件设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2019.
CHEN Junzhi. Design and experiment on V-groove dialing round type seed-guiding device of maize precision planting machine [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [24] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3): 75-87.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiler with maize straw returned to field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210308&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.008. (in Chinese)
- [25] 孙剑. 玉米根茬结构和力学特征及与土壤的摩擦学性能[D]. 长春:吉林大学,2011.
SUN Jian. Structural and mechanical characteristics of corn stubble and its tribological properties against soil[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
- [26] 王宏力,张伟,董晓威,等. 玉米根茬剪切力学性能试验与分析[J]. 实验力学,2014,29(1):73-82.
WANG Hongli, ZHANG Wei, DONG Xiaowei, et al. Experiment and analysis of shear mechanical property of corn stubbles [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(1): 73-82. (in Chinese)