

拨禾链式油葵割台静态滑切角恒定切割器设计与试验

刘 羊^{1,2} 黄小毛^{1,2} 马丽娜^{1,2} 宗望远^{1,2} 詹广超^{1,2} 林子欣^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对油葵缺乏适用切割器的问题,设计了拨禾链式油葵割台切割器。在阐述拨禾链式油葵割台切割器结构和工作原理的基础上,对滑切角恒定刀刃进行设计,确定了影响切割性能的关键结构与工作参数。对切割过程中植株受力和植株滑切过程功耗进行分析,确定了滑切角的选用范围;对割刀运动轨迹进行分析,明确了割刀转速范围;对植株几何切割位置进行分析,推导得出割刀安装位置范围。通过单因素试验得出,在滑切角为 50°~70°、割刀转速为 750~1 050 r/min、相对位置为 100~300 mm 范围内时,切割器功耗低、落粒损失率小。通过二次正交旋转试验,构建了转速、滑切角、相对位置与功耗、落粒损失率的回归方程,优化得出较优作业参数为:滑切角 61°、转速 750 r/min、相对位置 180 mm,此时对应功耗最小值为 64.08 W,落粒损失率最小值为 1.24%。为了验证该参数组合的准确性,进行了台架试验,结果表明,实际切割功耗为 66.12 W,实际落粒损失率为 1.28%,与预测值的误差在 5% 以内,该切割器满足油葵低损失切割要求。

关键词: 油葵收获机; 拨禾链; 回转式切割器; 静态滑切角

中图分类号: S225.5⁺9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)01-0099-10 OSID: 

Design and Test of Static Sliding Cut Angle Constant Cutting Machine for Chain Oil Sunflower Harvester Header

LIU Yang^{1,2} HUANG Xiaomao^{1,2} MA Lina^{1,2} ZONG Wangyuan^{1,2} ZHAN Guangchao^{1,2} LIN Zixin^{1,2}
(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: In view of the lack of suitable harvesting machinery for oil sunflower, the design and test of cutting machine for chain oil sunflower harvesting head were carried out. On the basis of expounding the structure and working principle of the cutter of chain oil sunflower cutting table, a rotary sawing blade was developed which had constant static slip angle and designed by using the mathematical equation of logarithmic helix, and the key structure and working parameters affecting the cutting performance were determined. The power consumption model of the sliding cutting process was analyzed to determine the selection range of the sliding cutting angle; the cutter's track was analyzed, the speed range was defined. Based on the analysis of geometric cutting position of plant, the range of installation position of cutting knife was deduced. The result was obtained by single factor experiment under the condition that the slip angle was 50°~70°, the cutting speed was 750~1 050 r/min and the relative position was 100~300 mm, the cutting power consumption was low and grain loss rate was less. The regression equations of the relationship between rotational speed, slip angle, relative position, and real-time power consumption and overall grain loss rate were constructed by quadratic orthogonal rotation test. By solving the regression equation, the optimum parameters were obtained as follows: the slip angle was 61°, the rotational speed was 750 r/min and the relative distance was 180 mm. At this point, the corresponding minimum power consumption value was 64.08 W, and the grain loss rate was 1.24%. In order to verify the accuracy of optimal parameter combination, a bench test was carried out, experimental results showed that the actual cutting power consumption was 66.12 W, the actual drop loss rate was 1.28%, the absolute error between the actual value and the predicted value was less than 5%, and the cutter met the requirements of low loss cutting of oil sunflower.

Key words: oil sunflower harvester; reel chain; rotary sawing cutter; static sliding angle

收稿日期: 2020-03-17 修回日期: 2020-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0702104)

作者简介: 刘羊(1989—),男,博士生,主要从事收获机械研究,E-mail: lyhake@163.com

通信作者: 宗望远(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控技术研究,E-mail: zongwangyuan@mail.hzau.edu.cn

0 引言

目前,油葵仍以人工收获方式为主,其成本昂贵、种植回报率低,严重制约了油葵产业的发展。油葵植株高大、茎秆粗壮、容易掉粒等特殊植株性状是导致传统机械化收获装备适应性差的主要原因,低损切割是油葵机械化收获的难题。因此对适宜油葵的切割器进行研究迫在眉睫。

国外关于油葵切割器的研究和应用起步较早^[1-3]:如美国 Fantini 公司油葵割台采用圆盘切割器,该切割器采用凹凸交替的弧形刃,具有高速切割、有效喂入等优点;Falcon 公司油葵割台采用动刀片和定刀片结合的方式实现对油葵的快速剪切,具有功耗低、空行程少的优点;乌克兰 ZIEGLER 公司油葵割台采用往复式切割器和甩刀式切割器组合的方式对油葵进行切割,同时对油葵籽进行粉碎。

国内研究的切割器主要包括往复式和回转式切割器^[4-5]:往复式切割器切割油葵时易造成植株振动及籽粒飞溅^[6],且与课题组提出的拨禾链式油葵割台在结构上存在空间布置的矛盾;回转圆盘式切割器可切割粗茎秆作物^[7-8],如刘芳建等^[9]、邢立冉^[10]设计的回转式圆盘切割器可对甘蔗、玉米等粗茎秆作物进行高效切割,范国强等^[11]设计小型圆盘切割器可高速切割作物,损失小。上述切割器直径较大或动力要求较高,限制了切割器在更大范围的使用。

目前,国内关于油葵植株切割器结构设计及参数优化方面鲜有报道。本文运用对数螺旋方程,结合油葵作物植株特性,设计一款适用于拨禾链式油葵割台的回转式切割器,并通过台架试验获取较优工作参数,以期为拨禾链式油葵割台的设计提供依据。

1 结构与工作原理

拨禾链式油葵割台由分禾头、分禾器、拨禾链、切割器、螺旋输送机、防飞溅网等组成,如图 1。拨禾链式油葵割台传动方式和结构与传统拨禾轮式油葵割台有较大的区别,而回转式切割器的切割方式和动力排布可以满足该割台的结构要求。

切割机构由动力系统、齿轮箱、两个刀盘、刀片等组成,见图 2。工作时,齿轮箱带动主动链轮转动,通过夹持链条驱动链轮转动,从动链轮通过链条驱动分布在分禾器两边的刀盘反向转动,对植株进行切割。根据物料运动状态,可将该切割过程分为 3 个阶段:拨禾阶段、夹持切割阶段、夹持输送阶段。拨禾阶段,即拨禾链将植株收拢至分禾器间隙中间,

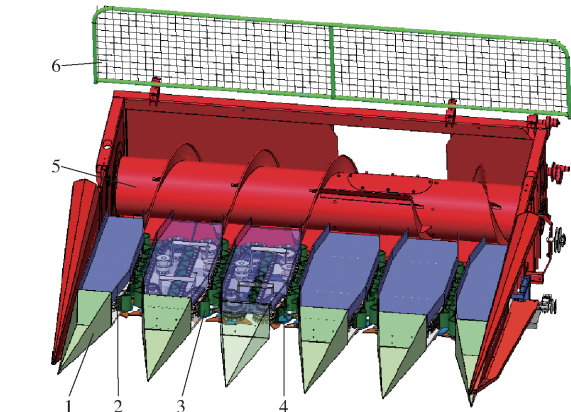


图 1 拨禾链式油葵割台总体结构图
Fig.1 General structure chart of chain oil sunflower harvester header

1. 分禾头 2. 分禾器 3. 拨禾链 4. 切割器 5. 螺旋输送机
6. 防飞溅网

然后拨送至切割器处。夹持切割阶段,即植株上端被夹持链夹持,植株下端被回转运动的切割器切割,由于刀片设计为对数螺旋线切削刃,该刃具有滑动切割效果,切割时,刃线上任意点的滑切角相等,从而单位时间内刃线参与切割的长度由内向外逐渐递增,切割过程平稳,切割功耗及切割振动更低^[12]。夹持输送阶段,即切割后的植株在夹持链的夹持输送作用下,运送至螺旋输送机。

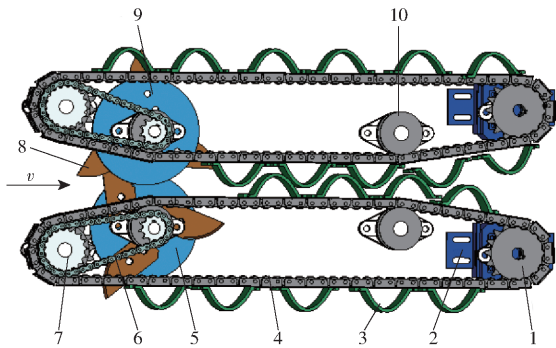


图 2 切割器及动力组成三维图
Fig.2 3D chart of cutting and power composition

1. 主动链轮 2. 齿轮箱 3. 柔性夹持元件 4. 拨禾链 5. 刀盘 A
6. 割刀动力链条 7. 从动链轮 8. 静态滑切角刀片 9. 刀盘 B
10. 中间链轮

2 切割机构设计

2.1 刃口曲线

滑切是较为省功的切割方式^[13],静态滑切角决定刀刃形状^[14]。本文根据对数螺旋线的滑切机理,设计静态滑切角恒定刀刃切割器,如图 3 所示。

图 3 中刀片刃线 $\widehat{AB}$ 任意一点都具有滑切效果, v_m 为机器前进的速度, v 为起始切割点 M 的切向速度, v' 为 M' 点处的切向速度。当刀盘以 ω 角速度

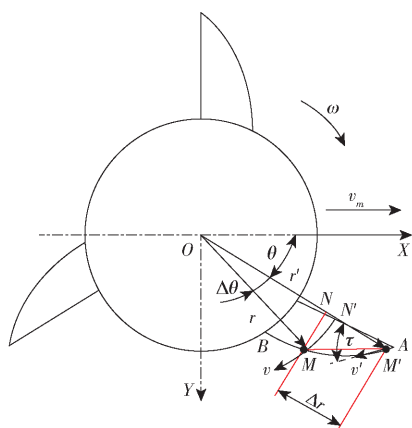


图3 静态滑切角恒定刀刃切割器结构示意图

Fig.3 Static sliding angle constant cutting edge cutting machine

绕轴中心 O 顺时针从起始极角 θ 转动 $\Delta\theta$ 时, 茎秆的位置从起始切割点 M 移至 M' 点, 起始切割点 M 到转动中心的矢径 r 变为切割点 M' 到转动中心的矢径 r' , 该阶段矢径增加 Δr , 根据微元法, 若 $\Delta\theta$ 很小 (趋近于 0), 则弧线 $\widehat{MN'}$ 近似为直线, 其弧长与弦长 MN 相等, N 是 MN 在 OM' 上的垂足, N' 是以 O 为中心、以 r 为半径转动到 r' 时的交点; OX 、 OY 分别为 X 、 Y 方向的坐标轴; 根据滑切角定义^[15], 滑切角 τ 等于极径与曲线交点处切向速度的夹角, 则在三角形 $\triangle MM'N$ 中近似等于 $\angle NM'M$, 可得

$$\tan\tau = \frac{l_{MN}}{l_{M'N}} = \frac{l_{\widehat{MN}}}{l_{OM'} - l_{ON}} = \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{(r' - \Delta r) \sin\Delta\theta}{\Delta r - (r' - \Delta r) \cos\Delta\theta} = \frac{(r' - \Delta r) \frac{\sin\Delta\theta}{\Delta\theta}}{\frac{\Delta r}{\Delta\theta} - \frac{(r' - \Delta r) \cos\Delta\theta}{\Delta\theta}} = \frac{r' d\theta}{dr} = \frac{\lim_{\Delta\theta \rightarrow 0} \frac{(r' - \Delta r) \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)}{\frac{\Delta\theta}{2}} + \frac{\Delta r \cos\Delta\theta}{\Delta\theta}}{\frac{\Delta\theta}{2}}$$

两边同时求积分得

$$r = Le^{\theta/\tan\tau} \quad (1)$$

式中 L ——积分常数, 等效刀刃的有效长度, mm

公式(1)即对数螺旋线极坐标方程, 其特点为: 轨迹曲线上经过极点 O 的射线与轨迹曲线交点的切线间夹角 (方向角) 均相等且等于滑切角^[16]。

为了确保进入分禾器间隙的植株都在切割范围, 处于分禾器间隙部分的刃长应该大于等于分禾器的间隙 S_f , 且有效切割刃长应大于植株最大直径^[17] $d_{\max}$, 即

$$\begin{cases} L \geq d_{\max} \\ L \geq S_f \end{cases} \quad (2)$$

将调研测量数据 $d_{\max} = 35.3$ mm、分禾器间隙 $S_f = 60$ mm 代入式(2), 解得 $L \geq 60$ mm, 考虑到刀刃的磨损, 保留余量 10 mm^[18], 综上本文取 $L = 70$ mm,

代入式(1), 得切割器刀刃方程为

$$r = 70e^{\theta/\tan\tau} \quad (3)$$

取不同的滑切角值代入式(3)中, 可获得不同静态滑切角恒定刃形曲线^[19-20]。

2.2 滑切角

回转式切割器滑切角过小, 割刀的惯性力容易造成油菜茎秆折断以及籽粒飞离葵盘; 若滑切角过大, 切割植株过程容易出现打滑, 造成植株切割不彻底, 并导致切割功耗增加^[21], 对植株切割过程进行分析, 植株受力如图 4a 所示, 则有

$$\begin{cases} F_N - F_x \cos\tau = ma_e \cos\tau \\ F_x \sin\tau - F_f = ma_\tau - ma_e \sin\tau \\ F_f = F_N \tan\varphi \end{cases} \quad (4)$$

式中 φ ——摩擦角, ($^\circ$)

m ——植株质量

a_e ——植株牵连加速度, m/s^2

a_τ ——植株切向加速度, m/s^2

F_N ——植株受到刀片的法向力, N

F_f ——植株受到沿刀刃切向的摩擦力, N

F_x ——茎秆内部对质心 M 处的摩擦力, N

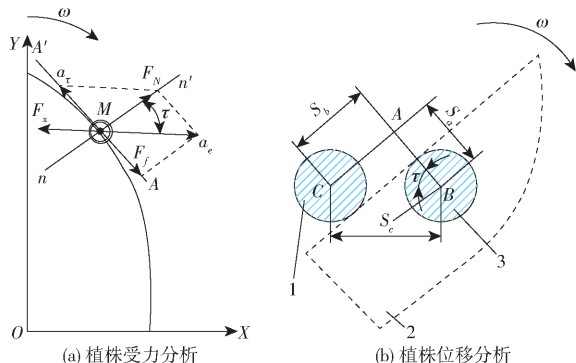


图4 植株受力及位移分析图

Fig.4 Analysis of plant force and displacement

1. 即将切割的植株 2. 刀片 3. 割断后的植株

植株运动如图 4b 所示, 在 $\triangle ABC$ 中 τ 是滑切角, S_a 是植株切断临界距离, 其值等于植株直径 d ; S_b 为植株在切向加速度作用下, 沿刀片切向运动距离即滑切距离; S_c 是植株相对刀片运动距离, t 为滑切时间, 其值等于相对刀片运动距离与机器前进速度之比, 即 $t = S_c/v_m$; 综上, 则有

$$\begin{cases} S_a = d \\ S_b = \frac{1}{2} a_\tau t^2 = \frac{1}{2} a_\tau \left(\frac{S_c}{v_m} \right)^2 = d \tan\tau \\ S_c = d / \cos\tau \end{cases} \quad (5)$$

植株滑切过程的平均功耗由支撑力、摩擦力做功组成^[22], 即

$$\bar{W} = F_N S_a + F_f S_b + F_x S_c \quad (6)$$

由式(4)~(6)可推导出滑切功耗表达式

$$\overline{W} = \frac{mv_m^2 d \sin(2\tau) (1 + \tan\tau \tan\varphi + \sec^2\tau)}{\tan\tau - \tan\varphi} \quad (7)$$

式中 φ ——摩擦角

若要产生滑切效果,滑切功耗须大于零,由式(7)可知,分母须大于零,即 $\varphi \leq \tau$ 。

滑切角过大会导致切割功耗增加,同时会产生有害的植株切割滑动,损害割刀的寿命,因此滑切角的范围不宜过大,应满足 $\tau \leq \pi/2 - \varphi$ [23],查阅机械设计手册 [24] 取摩擦角 $\varphi \approx 19^\circ$, 综上,可得滑切角取值范围为 $19^\circ \leq \tau \leq 71^\circ$ 。

2.3 割刀转速

为了分析割刀运动,以刀盘的运动中心为原点建立直角坐标系,如图5所示。

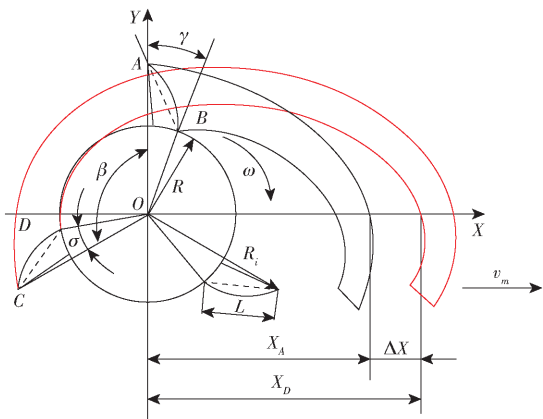


图5 割刀运动轨迹

Fig.5 Track of motion of cutters

考虑 t_1 时刻刀刃 AB 顶点 A 的坐标和 t_0 时刻刀刃 CD 的顶点 D 的坐标相等 [25], 则两次切割间隔的距离为 ΔX , 为避免漏割, 应有 $\Delta X_{\max} \leq 0$, 则割刀转速应满足条件 [26]

$$\begin{cases} \Delta X = X_D - X_A = v_m(t_0 - t_1) + R \sin(\omega t_0 - \beta + \sigma) - R_i \sin(\omega t_1) \\ \frac{\partial \Delta X}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial^2 \Delta X}{\partial^2 t} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

将 $\omega = n\pi/30$, $\sigma = \gamma - \arcsin\left(\frac{R}{R_i} \sin\gamma\right)$ 代入式(8)解得

$$\frac{30\beta v_m}{L \cos\gamma\pi} \leq n \quad (9)$$

其中

$$\beta = 2\pi/Z$$

式中 R ——刀盘半径, mm

R_i ——切割器顶点外圆半径, mm

γ ——刃倾角, ($^\circ$)

σ ——刀刃顶端与底端对于刀盘圆心的中心角, ($^\circ$)

β ——刀片间隔角, rad Z ——刀片个数

n ——割刀转速, r/min

现有联合收获机行走速度为 $0.6 \sim 2.0 \text{ m/s}$ [25], 将 $v_m = 1.35 \text{ m/s}$, $\beta = 2\pi/3$, $\gamma = 15^\circ$, $L = 70 \text{ mm}$ 代入公式(9)中, 解得 $n \geq 399 \text{ r/min}$ 。

2.4 刀片数目

为保证植株能被成功割断, 进距不大于刀刃有效长度 [25], 根据进距定义则有

$$\begin{cases} e = \frac{60v_m}{Zn} \\ e \leq L \end{cases} \quad (10)$$

式中 e ——刀盘每转过相邻两切刀中心线的半径所夹圆心角时机器前进的距离, 即进距, mm

将 $v_m = 1.35 \text{ m/s}$, $L = 70 \text{ mm}$ 以及 $n_{\min} = 399 \text{ r/min}$ 代入式(10)解得 $Z \geq 2.89$, 刀片数目过多, 会导致重复切割, 因此取最少刀片数目 $Z = 3$ 。

2.5 相对位置

拨禾链式油葵割台, 植株是在夹持作用下切割, 即夹持切割。割刀横向安装位置直接影响植株的喂入和切割效果 [27], 以主动喂入链轮中心位置为原点, 定义刀盘中心与主动喂入链轮中心距离为相对位置 X , 则割刀前置时, 相对位置 $X > 0$; 割刀位于主动喂入链轮正下方时, $X = 0$; 当割刀后置时, 定义 $X < 0$; 为确定割刀安装范围, 分析植株在夹持状态下临界位置, 如图6所示。

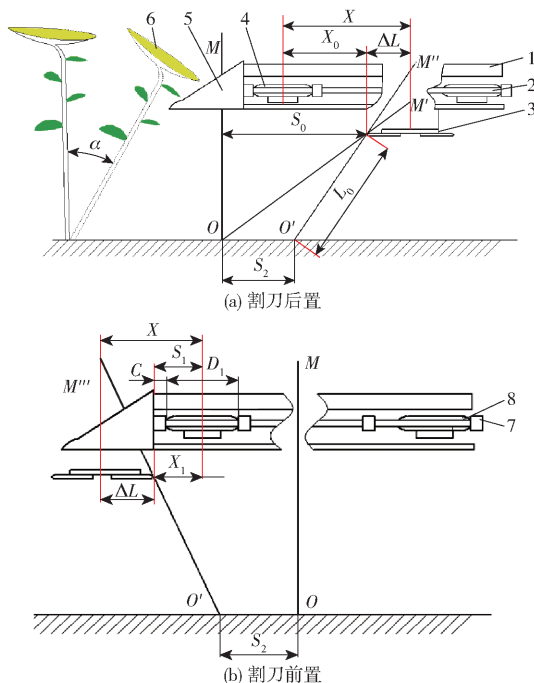


图6 夹持切割几何示意图

Fig.6 Geometric diagrams of gripping-cutting

1. 分禾器 2. 拨禾链 3. 切割器 4. 主动喂入轮 5. 分禾器头
6. 油葵植株 7. 柔性拨指 8. 从动链轮

(1)当拨禾链速度大于机器行走速度,则植株在夹持链作用下相对机器向后运动,如图 6a 所示,植株起始位置为 OM ,机器行走距离为 S_2 ,切割时的位置为 $O'M''$,则相对位置 $X = X_0 + \Delta L$,若机器不动,植株被拨禾链拨动至即将折断临界位置为 OM' ,则有

$$\begin{cases} X_0 < S_0 \\ S_0 = L_0 \sin \alpha \end{cases} \quad (11)$$

式中 X_0 ——割刀后置时,植株切割点与主动喂入链轮的相对位置,mm
 S_0 ——植株折断最大横向位移,mm
 L_0 ——留茬高度,mm
 α ——茎秆临界折弯角, (°)

(2)当拨禾链速度小于机器行走速度,则当植株在夹持链作用下,相对机器向前运动,由图 6b 可知,为保证植株切断后不掉落在分禾器外,植株即将脱离柔性拨指作用前应被切断,即在 $O'M'''$ 位置切断,对应相对位置 $X = X_1 + \Delta L$,根据几何关系 $X_1 \leq S_1$,为避免干涉, S_1 不小于主动喂入轮半径与柔性拨指长度之和,则有

$$\begin{cases} X_1 \leq S_1 \\ S_1 \geq D_l/2 + C \end{cases} \quad (12)$$

式中 X_1 ——割刀前置时,植株切割点与主动喂入链轮的相对位置,mm
 S_1 ——从动链轮中心与分禾器头后端的安装距离,mm
 D_l ——主动喂入链轮直径,mm
 C ——柔性拨指长度,mm

(3)拨禾链速度等于机器行走速度,则割刀位于主动喂入轮正下方或后方皆可。

综上所述,可得割刀与主动喂入轮的相对位置范围为

$$-(X_1 + \Delta L) \leq X \leq X_0 + \Delta L \quad (13)$$

式中 ΔL ——刀片作用植株上的切割点与刀盘中心的距离,mm

油葵高度范围在 1 200 ~ 2 000 mm,根据保护性耕作要求,留茬长度 L_0 约为茎秆长度的 $1/3$ ^[28],取留茬高度 $L_0 = 650$ mm,根据切割器实际结构, ΔL 变化范围为 70 ~ 140 mm,取中位数值 $\Delta L = 105$ mm,茎秆临界折弯角最小值 $\alpha_{\min} = 17.93^\circ$, $L_0 = 650$ mm, $D_l = 120$ m, $C = 50$ mm,代入公式 (11) ~ (13),可得相对位置范围: $-215 \text{ mm} < X < 305 \text{ mm}$ 。

3 台架试验

3.1 试验材料与试验装置

试验材料为“矮大头 DW667”,其物料特性见

表 1,试验设备包括 3 个变频器(徐州锐普科技有限公司,量程分别为 5、1.5、1.5 kW)、转速仪(香港希玛仪器仪表有限公司,转速范围:0 ~ 30 000 r/min,精度: $\pm 0.5\%$)、扭矩仪(北京新宇航测控科技股份有限公司,扭矩仪范围:0 ~ 100 N · m,精度: $\pm 0.5\%$),于 2018 年 8 月 20 日及 2020 年 6 月 5 日在湖北省黄石市太子镇开展台架试验,试验台架见图 7。

表 1 油葵物料特性参数

Tab.1 Oil sunflower material characteristic parameters

参数	数值
植株高度/mm	1 200 ~ 2 000
茎秆直径/mm	18.2 ~ 35.3
葵盘平均厚度/mm	22.7
葵盘平均直径/mm	156.5
茎秆临界折弯角/(°)	17.93 ~ 55.49
茎秆含水率/%	70 ~ 80
籽粒含水率/%	25 ~ 35

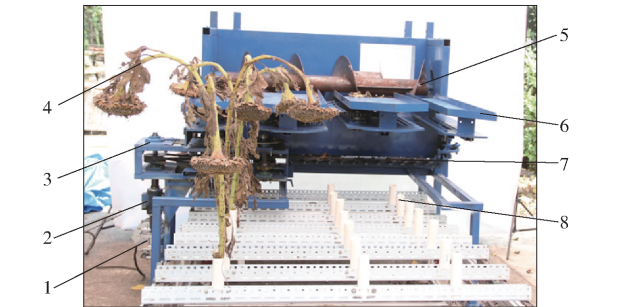


图 7 试验台架

Fig. 7 Test bench

1. 电机 2. 扭矩仪 3. 静态滑切角恒定切割器 4. 油葵植株
5. 螺旋输送机 6. 分禾器 7. 往复式切割器 8. 植株输送装置

3.2 试验设计与方法

3.2.1 试验设计

根据前人研究 ^[29] 结合前期试验结果,刀刃滑切角、割刀转速、割刀与主动喂入链轮的相对位置是影响切割功耗和落粒损失率的主要因素,因而选取这 3 个因素进行单因素试验,以获取合适的因素变化范围,并在该范围内开展二次回归正交旋转组合试验,以求解较优参数组合。

3.2.2 试验方法

试验前,通过切割装置的变频器调节割刀转速,待割刀转速平稳后,测量出割刀空转时的功耗,并将 6 株处于适收期、直径接近 25 mm 的油葵插入植株输送装置的固定筒中,通过变频器调节植株输送装置速度至 1.35 m/s,启动植株输送装置电机,以切割 6 株植株为一组试验,每次试验结束后求出 6 株植株的总切割功耗并求出每株植株平均切割功耗;统

计该组落粒质量及将葵盘脱粒称量,求出该组试验的落粒总损失及每株平均落粒损失,每组试验重复3次,求均值。

3.2.3 试验指标

落粒损失和切割功耗是切割的重要评价指标,功耗通过安装在台架上的扭矩仪进行测量,计算植株切割功耗时,其值为电机负载功耗减去空转时的功耗,扭矩传感器可实测扭矩变化值,每组试验统计6株植株的切割总功耗求均值,求出切割植株的功耗

$$P_{\delta} = P_{\delta 1} - P_{\delta 0} = \frac{(T_1 - T_0) \bar{n}}{9.55} \tag{14}$$

式中 P_{δ} ——切割功耗,W
 $P_{\delta 0}$ ——空载时功耗,W
 $P_{\delta 1}$ ——负载时总功耗,W
 T_0 ——空载时扭矩,N·m
 T_1 ——扭矩传感器实测总扭矩,N·m
 $\bar{n}$ ——平均转速,r/min

试验时选取直径、葵盘颜色及大小相近的植株进行试验,每组试验结束后,收集掉落籽粒以及将该组6株葵盘脱粒并称量籽粒,定义落粒损失率 w 为掉落籽粒质量与葵盘总籽粒质量之比,即

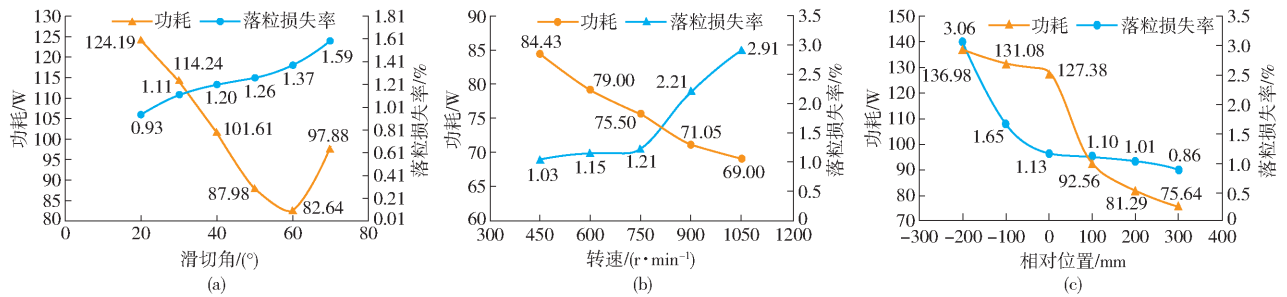


图 8 单因素试验结果
Fig. 8 Single factor test results

3.3.2 多因素试验

为了寻找较优参数组合,根据 Box - Behnken 试验原理设计三因素三水平的二次回归正交旋转组合试验^[30],共 17 组试验,每组试验重复 3 次求均值,单因素试验结果表明,在滑切角为 50° ~ 70°,转速为 750 ~ 1 050 r/min,相对位置为 100 ~ 300 mm 范围内功耗较低、落粒损失较少,因素编码见表 2。

表 2 因素编码
Tab.2 Factor coding

编码	试验因素		
	滑切角	转速	相对位置
	$x_1/(^{\circ})$	$x_2/(r \cdot min^{-1})$	x_3/mm
-1	50	750	100
0	60	900	200
1	70	1 050	300

$$w = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\% \tag{15}$$

式中 m_1 ——掉落籽粒质量,g
 m_2 ——葵盘剩余籽粒质量,g

3.3 结果与分析

3.3.1 单因素试验

通过课题组前期试验表明,当割刀转速大于 1 200 r/min 时,割刀振动较大。结合前文理论分析,转速在 399 ~ 1 200 r/min 内选取 5 个水平,滑切角在 20° ~ 70° 范围内选取 6 个水平;相对位置在 - 215 ~ 306 mm 选择 6 个水平。

如图 8a 所示,切割功耗随滑切角增大先减小后增加,在 60° 有最小值;落粒损失率随着滑切角的增加逐渐增加。如图 8b 所示,切割功耗随着转速增加逐渐降低,落粒损失率随着转速的增加而增加,在 750 ~ 1 050 r/min 范围内,落粒损失率整体降低,功耗逐渐降低。如图 8c 所示,当相对位置小于 0 时,切割功耗和落粒损失率随着相对位置绝对值增大而变大,当相对位置大于等于 0 时,切割功耗和落粒损失率随着相对位置增大而降低,落粒损失率在 100 ~ 300 mm 范围内整体较低且变化不显著,切割功耗逐渐减低。

二次回归正交旋转组合试验结果如表 3 所示,利用 Design-Expert 软件对表 3 数据进行方差分析和显著性检验,结果见表 4。

由表 4 可知,功耗回归模型显著性检验值 $P = 0.009 (P < 0.01)$,失拟性检验值 $P = 0.092 (P > 0.05)$,功耗回归模型极显著,失拟不显著。落粒损失回归模型显著性检验值 $P = 0.001 (P < 0.01)$,失拟性检验值 $P = 0.294 (P > 0.05)$,落粒损失回归模型极显著且失拟不显著,方差分析结果表明回归模型与实际拟合较好。由表 4 可知,各因素对切割功耗和落粒损失的影响主次顺序均为:转速、滑切角、相对位置;通过显著性分析可知,滑切角、转速对切割功耗和落粒损失影响极显著 ($P < 0.01$),相对位置对切割功耗和落粒损失影响不显著 ($P > 0.05$),剔除不显著因素,则功耗 Y_1 回归方程和落粒

表 3 正交试验设计与结果

Tab.3 Orthogonal test design and results

试验号	滑切角 $x_1/(^{\circ})$	转速 $x_2/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	相对位置 x_3/mm	功耗 Y_1/W	落粒损失率 $Y_2/\%$	试验号	滑切角 $x_1/(^{\circ})$	转速 $x_2/$ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	相对位置 x_3/mm	功耗 Y_1/W	落粒损失率 $Y_2/\%$
1	50	750	200	75.98	1.08	10	60	1 050	100	50.75	3.81
2	70	750	200	63.95	1.83	11	60	750	300	59.10	3.31
3	50	1 050	200	68.16	1.65	12	60	1 050	300	46.71	3.20
4	70	1 050	200	52.91	3.13	13	60	900	200	63.31	1.15
5	50	900	100	68.50	2.15	14	60	900	200	62.82	1.83
6	70	900	100	63.18	3.67	15	60	900	200	65.76	1.56
7	50	900	300	73.67	2.63	16	60	900	200	68.70	1.54
8	70	900	300	62.12	2.56	17	60	900	200	63.98	1.75
9	60	750	100	69.60	1.81						

表 4 方差分析

Tab.4 Variance analysis

来源	功耗					落粒损失率				
	自由度	离差平方和	均方	F	P	自由度	离差平方和	均方	F	P
模型	9	855.10	95.01	6.71	0.009	9	0.001 156	0.000 128	14.01	0.001
线性	3	571.00	190.33	13.45	0.003	3	0.000 347	0.000 116	12.6	0.003
x_1	1	243.65	243.65	17.22	0.004	1	0.000 169	0.000 169	18.45	0.004
x_2	1	313.75	313.75	22.17	0.002	1	0.000 177	0.000 177	19.26	0.003
x_3	1	13.60	13.60	0.96	0.360	1	0.000 001	0.000 001	0.09	0.770
x_1^2	1	119.70	119.70	8.46	0.023	1	0.000 001	0.000 001	0.07	0.803
x_2^2	1	105.08	105.08	7.43	0.030	1	0.000 043	0.000 043	4.65	0.068
x_3^2	1	48.05	48.05	3.40	0.108	1	0.000 555	0.000 555	60.51	0.009
x_1x_2	1	2.59	2.59	0.18	0.682	1	0.000 013	0.000 013	1.45	0.267
x_1x_3	1	9.70	9.70	0.69	0.435	1	0.000 063	0.000 063	6.89	0.034
x_2x_3	1	10.43	10.43	0.74	0.419	1	0.000 111	0.000 111	12.13	0.010
误差	7	99.06	14.15			7	0.000 064	0.000 009		
失拟	3	76.18	25.39	4.44	0.092	3	0.000 036	0.000 012	1.75	0.294
纯误差	4	22.88	5.72			4	0.000 028	0.000 007		
合计	16	954.16				16	0.001 2			

损失率 Y_2 回归方程为

$$Y_1 = 133.5 - 6.74x_1 + 0.372x_2 + 0.0515x_1^2 - 0.000230x_2^2$$

(16)

$$Y_2 = -10.35 + 0.1255x_1 + 0.01017x_2 + 0.000117x_3^2 - 0.000398x_1x_3 - 0.000035x_2x_3$$

(17)

切割器的滑切角、转速、相对位置等因素对功耗 Y_1 和落粒损失率 Y_2 的响应曲面如图 9、10 所示。

如图 9a 所示,在转速为 900 r/min 时,功耗随着相对位置增加而降低,原因在于随着相对位置增加,植株存在斜切和削切,导致切割功耗降低;功耗随着滑切角增加先降低后增加,在 60°处有最小值,原因在于随着滑切角增大,滑切位移增加,滑切阻力减少导致功耗减低;滑切角继续增大功耗反而增加,原因在于滑切时间增加,摩擦阻力做功增加,摩擦做功消耗量大于滑切时功耗减少量,导致整体功耗增加。由图 9b 可知,在相对位置为200 mm 时,功耗随着切

割速度增加而减低,原因在于切割过程中挤压阶段功耗消耗最大,随着转速增加,油葵茎秆开始切割前挤压阶段所占比例下降,即割刀挤压油葵秆层的移动距离减少,导致功耗降低;功耗随着滑切角增加,先降低后增加,原因与图 9a 分析一致。由图 9c 可知,在滑切角为 60°时,功耗随着切割速度增加而降低,原因同图 9b 分析,功耗随着相对位置增加而降低,原因同图 9a 分析。

如图 10a 所示,在相对位置为 200 mm 时,落粒损失率随着转速和滑切角增加而变大,原因在于当转速增加,切割接触瞬间对植株的冲击变大导致落粒损失率增加;当滑切角增大,植株切割过程时间增加,植株振动时间增长,植株落粒损失增加。如图 10b所示,在转速为 900 r/min 时,落粒损失率随着相对位置增加先降低后变大,原因在于相对位置增加,植株存在斜切和削切,减小了切割时的冲击,导致落粒损失率降低,当相对位置增加,植株容易折

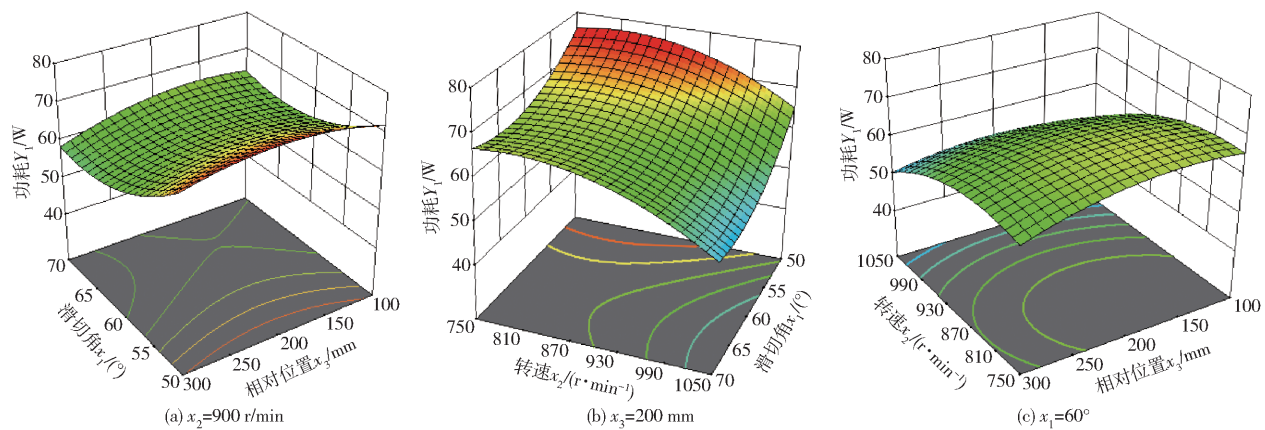


图9 交互因素影响功耗的响应曲面

Fig. 9 Response surfaces with interaction factors affecting power consumption

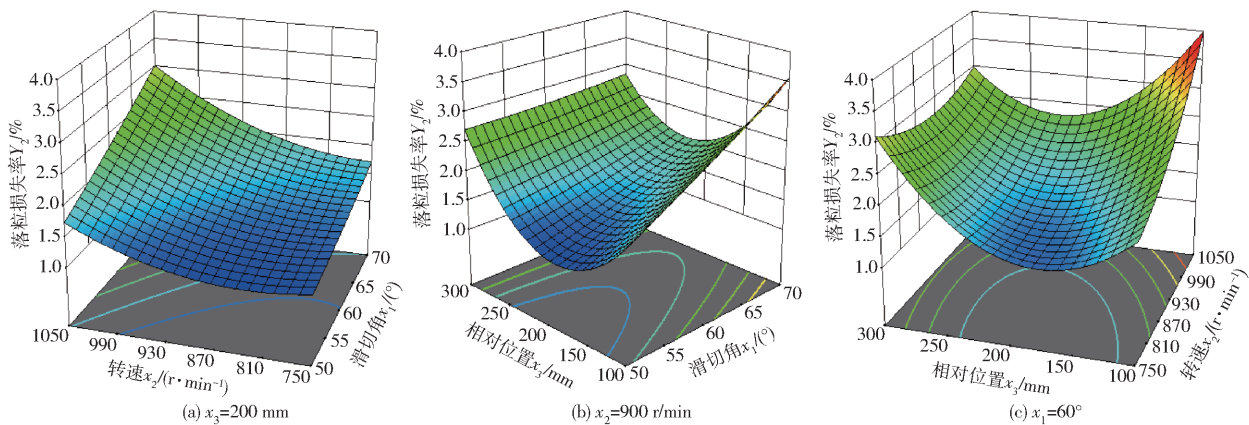


图10 交互因素影响落粒损失率的响应曲面

Fig. 10 Response surface of interaction factors affecting drop loss rate

断及存在葵盘掉落损失,造成落粒损失率增加。落粒损失率随着滑切角增加而增加,原因同对图 10a 的分析。如图 10c 所示,在滑切角为 60°时,落粒损失率随着相对位置增加先降低后增加,原因同对图 10b 的分析。落粒损失率随转速的变化分为两种情况:当相对位置处于较低水平时,落粒损失率随着转速的增加而增加,原因同对图 10a 的分析;当相对位置处于较高水平时,落粒损失率随着切割速度的增加先降低后增加,原因在于起始阶段切割速度较低且相对位置较大,植株夹持切割姿态较差,植株容易被打弯或者倾倒姿态下切割,未能实现一刀切断,造成葵盘掉落,导致损失较大。随着速度增加,植株一刀切断成功率提高,掉落葵盘较少,主要损失为植株冲击振动损失,因此落粒损失率降低;当速度超过切割临界速度,落粒损失为主要损失,速度越大冲击越大,因此落粒损失率继续增加。

3.4 参数优化及验证

实际应用中,农户更加关注损失率,结合前人研究^[31],设定落粒损失率和功耗的权重分别为 0.65 和 0.35,为了获取较优工作参数,利用 Design-Expert 软件中的优化模板求解,对应目标及约束条件为

$$\begin{cases} \min Z = 0.35Y_1 + 0.65Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} 50^\circ \leq x_1 \leq 70^\circ \\ 750 \text{ r/min} \leq x_2 \leq 1\,050 \text{ r/min} \\ 100 \text{ mm} \leq x_3 \leq 300 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

通过 Design-Expert 软件得出较优参数组合为:滑切角 60.71°、转速 750 r/min、相对位置为 176.77 mm,取整后分别为:滑切角为 61°,转速为 750 r/min,相对位置为 180 mm,此时功耗最小值为 64.08 W,落粒损失率最小值为 1.24%。

为了验证优化结果的可行性,在湖北省黄石市太子镇以优化的参数组合(滑切角为 61°,转速为 750 r/min,相对位置为 180 mm)条件下开展台架验证试验,为了消除误差,试验重复 3 次求平均值,得出实际切割功耗为 66.12 W,实际落粒损失率为 1.28%,与预测值的误差在 5% 以内,试验结果与优化结果基本吻合,优化参数组合可行。

4 结论

(1) 针对油菜制台缺少适宜切割装置的问题,根据对数螺旋线特性设计了静态滑切角恒定的回转式切割器。

(2)采用单因素试验研究了滑切角、转速、相对位置对功耗和落粒损失的影响,结果表明:在滑切角为 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 、转速为 $750 \sim 1\,050\text{ r/min}$ 、相对位置为 $100 \sim 300\text{ mm}$ 的范围内,切割器功耗较低、落粒损失整体较少。

(3)根据 Box - Behnken 试验设计原理,进行了

三因素三水平二次回归正交旋转组合试验,通过响应面分析法优化求解出装置的较优参数为:滑切角为 61° 、转速为 750 r/min 、相对位置 180 mm 。通过验证试验得出参数组合下的切割功耗为 66.12 W 、实际落粒损失为 1.28% ,与预测值的误差在 5% 以内,效果较好。

参 考 文 献

- [1] MILLER K A. Corn stalk harvester and windrow attachment for a corn picker header: US4148175[P]. 1979-04-10.
- [2] ABD EIMAKSOUD M A F, ELSAYED G H, SHALAB Y, et al. Modifying and testing a header system for cereal crop harvester to be suitable for sunflower harvesting[J]. Egyptian Journal of Agricultural Research, 2009, 23(3):34-43.
- [3] SZENDRO P, SZABO I. Reduction of the loss of sunflower harvesting[J]. Hungarian Agricultural Engineering, 1990, 34(5):20-21.
- [4] 张燕青, 崔清亮, 郭玉明, 等. 谷子茎秆切割力学特性试验与分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(4):146-155, 162. ZHANG Yanqing, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Experiment and analysis of cutting mechanical properties of millet stem [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):146-155, 162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.016. (in Chinese)
- [5] 罗海峰, 汤楚宙, 邹冬生, 等. 龙须草茎秆往复切割试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2):13-17. LUO Haifeng, TANG Chuzhou, ZOU Dongsheng, et al. Experiment on reciprocating cutting of longmu grass stem [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2):13-17. (in Chinese)
- [6] 蒋韬, 侯加林, 李天华, 等. 田间玉米茎秆往复切割试验台[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2):32-36. JIANG Tao, HOU Jialin, LI Tianhua, et al. Field reciprocating cutting test bench for cron stalks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):32-36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.007. (in Chinese)
- [7] 邬备, 王德成, 王光辉, 等. 割草机切割压扁装置运行参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10):76-83. WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Optimization and experiments of cut-condition device working parameter on mower conditioner[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):76-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171009&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.009. (in Chinese)
- [8] 郑乐, 罗锡文, 曾山, 等. 水稻根茬-土壤复合体剪切特性试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5):63-71. ZHENG Le, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Shear characteristics of rice root-soil composite[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):63-71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170507&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.007. (in Chinese)
- [9] 刘芳建, 杨学军, 方宪法, 等. 甘蔗收获机切段装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9):90-95. LIU Fangjian, YANG Xuejun, FANG Xianfa, et al. Design and experiment of chopper device in sugarcane harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9):90-95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.010. (in Chinese)
- [10] 邢立冉. 锯盘式秸秆粉碎还田机研制与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013. XING Liran. Development and test of a saw-disc type straw crushing and returning machine[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [11] 范国强, 杨庆璐, 张晓辉, 等. 烟草夹持式智能打顶机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7):121-126. FAN Guoqiang, YANG Qinglu, ZHANG Xiaohui, et al. Design and test of intelligent tobacco topping machine with clamping belt[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):121-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170715&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.015. (in Chinese)
- [12] 郭茜, 张西良, 徐云峰, 等. 藤茎类秸秆专用切割刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24):47-53. GUO Xi, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Design and experiment of special cutting blade for cane stalk [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24):47-53. (in Chinese)
- [13] 周华, 张文良, 杨全军, 等. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5):71-78. ZHOU Hua, ZHANG Wenliang, YANG Quanjun, et al. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):71-78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190508&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.008. (in Chinese)
- [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 cutting edge curve of corn stubble shovel cutting tool [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12):13-17. (in Chinese)
- [15] 侯守印, 陈海涛, 邹震, 等. 原茬地种床整备侧向滑切清秸刀齿设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(6):41-51, 217.

- HOU Shouyin, CHEN Haitao, ZOU Zhen, et al. Design and test of side-direction straw-cleaning blade for seedbed treatment of original stubble planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 41–51, 217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190605&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.005. (in Chinese)
- [16] 严导淦. 对数螺线及其物理意义[J]. 物理与工程, 2013, 23(5): 5–9.
YAN Daogan. Logarithmic helix and its physical meaning [J]. Physics and Engineering, 2013, 23(5): 5–9. (in Chinese)
- [17] 罗承宇, 邹湘军, 叶敏, 等. 荔枝采摘机器人非线性运动刀具设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 247–252, 246.
LUO Chengyu, ZOU Xiangjun, YE Min, et al. Design of nonlinear motion cutter for litchi harvesting robot [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 247–252, 246. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s144&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.044. (in Chinese)
- [18] 滕绍民. 自走式青饲收割机不分行割台切割机理的研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2004.
TENG Shaomin. Study on cutting mechanism of non-branch cutting table of self-propelled green-feeding harvester [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2004. (in Chinese)
- [19] 张春岭, 夏俊芳, 张居敏, 等. 六头螺旋秸秆还田耕整机刀辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 25–34.
ZHANG Chunling, XIA Junfang, ZHANG Jumin, et al. Design and experiment of knife roller for six-head spiral straw returning cultivator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 25–34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190303&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.003. (in Chinese)
- [20] 杨康, 赵丽梅, 张大斌, 等. 秸秆粉碎机刀曲线优化设计[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(6): 130–133.
YANG Kang, ZHAO Limei, ZHANG Dabin, et al. Optimization design of blade curve of straw grinder [J]. Mechanical Design and Research, 2017, 33(6): 130–133. (in Chinese)
- [21] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刀深松铲研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62–72.
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. 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. (in Chinese)
- [22] 平忠源. 方捆机压缩室切刀对玉米秸秆的切割过程分析及试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
PING Zhongyuan. Analysis and experimental study on cutting process of corn straw by cutting knife in compression chamber of square bale machine [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [23] 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 108–116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108–116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s017&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017. (in Chinese)
- [24] 徐灏, 周国斌编. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [25] 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: 1112–1126.
- [26] 卿上乐, 区颖刚, 刘庆庭. 甘蔗收割机单圆盘切割器运动学分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 51–54.
QING Shangle, OU Yinggang, LIU Qingting. Kinematic analysis of single disk cutter for sugarcane harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 51–54. (in Chinese)
- [27] 张宗玲, 韩增德, 刘立晶, 等. 玉米穗茎兼收割台夹持输送装置参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 114–121.
ZHANG Zongling, HAN Zengde, LIU Lijing, et al. Parameters optimization for gripping and delivering device of corn harvester for reaping both corn stalk and spike[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 114–121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180313&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.013. (in Chinese)
- [28] 王刚, 贾洪雷, 赵佳乐, 等. 玉米留高茬切割器的设计及留茬效果试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 43–49.
WANG Gang, JIA Honglei, ZHAO Jiale, et al. Design of corn high-stubble cutter and experiments of stubble retaining effects [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 43–49. (in Chinese)
- [29] 丁素明, 薛新宇, 蔡晨, 等. 梨树枝条切割装置刀片参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊2): 75–82.
DING Suming, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Optimization and experiment of blade parameter for pear branches cutting device [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 75–82. (in Chinese)
- [30] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 微垄式覆膜覆土联合作业机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 97–105, 129.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of operation machine for filming and covering soil on tiny ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 97–105, 129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200311&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.011. (in Chinese)
- [31] 廖庆喜, 万星宇, 李海同, 等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 24–31.
LIAO Qingxi, WAN Xingyu, LI Haitong, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 24–31. (in Chinese)