

油菜割晒机双曲柄平面五杆拨禾轮设计与试验

张敏 金梅 王刚 梁苏宁 吴崇友

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要:为减少油菜割晒机拨禾轮易缠绕和挂禾等问题,提出了一种双曲柄平面五杆拨禾轮机构,建立了该拨禾轮机构的运动学分析模型。根据双曲柄平面五杆机构存在的约束条件,基于编制的拨禾轮拨指运动分析程序,采用人机交互方式得到了一组满足油菜割晒机要求的拨禾轮机构结构参数组合,实现了拨禾轮拨指低速入禾、加速推送、快速出禾和拨指翻转的动作要求,与偏心式拨禾轮相比,同等回转半径和转速下,增大了拨指动态轨迹“环扣”的高度和宽度。分析了拨禾轮机架初始安装角度以及机具前进速度等参数变化对拨禾轮拨指运动状态、速度、加速度和轨迹的影响,分析得出拨指在一个旋转周期内速度为非匀速变化,拨禾过程拨指速度缓慢变化,加速度无突变,通过拨禾轮转速和机具前进速度合理匹配,可实现零速扶禾,对油菜穗头冲击小,减少缠绕。对比分析得出双曲柄平面五杆机构拨禾轮的拨禾轮线速度比可以按拨禾轮匀速转动并以拨禾轮轴为中心的拨指尖静态轨迹最小内接圆半径为长度的圆周线速度近似计算。开展了双曲柄平面五杆机构拨禾轮和偏心式拨禾轮油菜割晒机对比试验,田间试验表明,相同试验条件下,采用双曲柄平面五杆机构拨禾轮的割晒机铺放角度不大于25°,铺放角度差不大于8°,拨禾轮转速对铺放角度的影响不显著($P=0.165>0.1$),拨禾轮类型差异对铺放角度的影响极显著($P=0.002<0.05$)。拨禾轮转速对铺放角度差的影响不显著($P=0.750>0.1$),拨禾轮类型差异对铺放角度差的影响显著($P=0.015<0.1$),双曲柄平面五杆机构拨禾轮试验全程未出现拨禾轮挂禾和缠绕现象。

关键词: 油菜; 割晒机; 拨禾轮; 双曲柄平面五杆机构

中图分类号: S225.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0115-08

OSID:



Design and Test of Double Crank Planar Five-bar Reel in Rape Windrower

ZHANG Min JIN Mei WANG Gang LIANG Suning WU Chongyou

(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to solve the problems such as easy winding and hanging of the reel of rape windrower, a double crank plane five-bar reel mechanism was proposed, and the kinematic analysis model of the reel mechanism was established. According to the constraints of the double crank plane five-bar mechanism, based on the compiled reel finger movement analysis program, a set of structural parameter combinations of the reel mechanism meeting the requirements of rape cutting reel was obtained by human-computer interaction. The movement requirements of the reel's finger for low-speed entry, accelerated push, fast delivery and finger upturned was realized. Compared with the eccentric reel, the dynamic trajectory of the reel was increased at the same turning radius and revolving speed. Height and width of the reel buckle of the reel finger dynamic trajectory were increased. The influence of the initial structure angle of the reel and the advancement speed of the machine on the motion state, speed, acceleration and trajectory of the reel finger was analyzed. The analysis showed that the speed of the reel finger was changed at a non-uniform speed during a rotation period, the reel finger speed was changed slowly during the reeling process, and there was no sudden change in acceleration. By reasonably matching the reel rotation speed and the forward speed of the machine, zero-speed lifting of the grains could be realized, the impact on the rape head was small, and the twine was reduced. The comparative analysis showed that the ratio of

收稿日期: 2021-02-02 修回日期: 2021-03-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0702100)、财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-12-01A)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(S201921)

作者简介: 张敏(1979—),男,研究员,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: zhangmin01@caas.cn

通信作者: 吴崇友(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: 542681935@qq.com

the reel linear velocity of the double crank plane five-bar mechanism reel can be obtained by approximately calculating the circumferential linear velocity of the finger tip static trajectory with the reel axis as the center and the minimum inscribed circle radius as the length at a constant rotated speed. A comparative test of double crank plane five-bar mechanism reel and cam-action reel for rape swathing was carried out. Field experiments showed that the laying angle and angle difference was respectively less than or equal to 25° and 8° of the windrower with double crank planar five-bar mechanism reel under the same test conditions. The effect of the reel speed on the laying angle was not significant ($P=0.165>0.1$), and the difference of the reel type had an extremely significant effect on the laying angle ($P=0.002<0.05$). The reel speed had no significant influence on the laying angle difference ($P=0.750>0.1$), the reel difference had a significant influence on the laying angle difference ($P=0.015<0.1$). There was no hanging and entanglement of the double crank plane five-bar mechanism reel in the whole test. The research result can provide the basis for the improvement of swathing laying regularity and reducing entanglement and hanging of rape windrower.

Key words: rape; windrower; reel; double crank planar five-bar mechanism

0 引言

拨禾轮是油菜割晒机上的一个重要工作部件,其作用是把待割油菜向切割器引导或对倒伏油菜在引导过程中扶正,在切割时扶持茎秆并把割断的茎秆向后推送,防止已割的茎秆在割刀上堆积造成堵刀和拥堵^[1-4]。油菜割晒铺放整齐、一致性好不仅有利于通风晾晒,同时也有利于后续捡拾的顺畅作业。但由于油菜分枝多,围绕主枝发散生长且高低不齐,不同植株间植株分叉交错,互相牵扯,在对植株高大、分枝多的油菜割晒作业时,油菜缠绕拨禾轮及拨禾轮挂禾、回带等问题突出,既影响割晒作业效率的提高,同时也影响割晒铺放整齐性和一致性^[5-8]。

目前,国内研发的油菜割晒机均采用偏心式拨禾轮^[9-16],偏心式拨禾轮有利于扶起倒伏作物并减少对作物穗头的打击,但由于拨禾轮拨指运动过程中全程姿态向下且不变,对油菜这类高大植株和分枝较多的作物易存在缠绕和挂禾等问题,影响油菜割晒机的作业效率提升和铺放质量的提高。为减少拨禾轮对植株高大分枝较多的油菜等作物易缠绕、挑草和挂禾的问题,国外油菜割晒机一般采用大直径翻转式拨禾轮,结构形式有多连杆与滑道式等类型^[17],该种类型的拨禾轮在拨禾返程段拨指翻转,拨指回转一周回转半径大,拨指姿态在拨禾过程中实时变化,可显著减少秸秆缠绕和挂禾现象,但对我国植株高大、分枝多的油菜仍存在缠绕和挂禾现象,同时也存在机构结构复杂,滑道式拨禾轮滑道材料要求高、成本昂贵等问题,目前主要用于大型割晒机。因此,急需针对我国油菜作物的生物特性,研制结构简单,能实现拨禾轮拨指翻转、回转半径大且能适应植株高大分枝多油菜的割晒机拨禾轮,以提高油菜割晒作业铺放质量和作业效率。

本文针对上述问题,在分析拨禾轮缠绕机理的基础上,基于双曲柄平面五杆机构运动学原理,设计一种双曲柄平面五杆油菜割晒机拨禾轮,并对其进行运动学分析和参数优选,实现拨禾轮拨指翻转和大回转半径的动作要求,降低油菜割晒拨禾过程的秸秆缠绕、挑草和挂禾等问题,提高油菜割晒铺放质量和作业效率。

1 机构基本结构与工作原理

为实现拨禾轮拨指在油菜割晒过程中扶禾、拨禾和割倒快速回撤的动作要求,设计了双曲柄平面五杆拨禾轮,其机构结构如图1所示,主要由拨禾轮轴、偏心盘、圆环、拨禾轮拨指、拨指座、连杆和支架等部件组成。

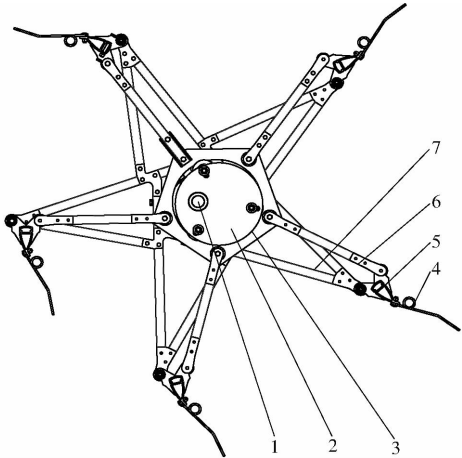


图1 双曲柄平面五杆拨禾轮结构图

Fig.1 Sketch of double crank planar five-bar reel mechanism

- 1. 拨禾轮轴 2. 偏心盘 3. 圆环 4. 拨禾轮拨指 5. 拨指座
- 6. 连杆 7. 支架

工作时,偏心圆盘固定不动,支架固定在拨禾轮轴上,拨禾轮轴在动力源的带动下匀速旋转,支架转动带动与支架连接的拨指座和连杆运动,支架一端铰接在圆环上,圆环相对偏心圆环的圆心转动,拨指

支架座一端至拨禾轮轴和拨指支架座另一端至偏心圆盘中心构成 2 个曲柄,形成分别绕拨禾轮轴和偏心圆盘中心的双曲柄平面五杆机构。调节偏心圆盘的安装角度可以调整拨禾轮整体偏转角度,拨禾轮拨指固定在拨指座上,拨指在 2 个曲柄同方向、匀速转动的作用下完成拨禾轮拨指的拨禾运动要求。

2 双曲柄平面五杆机构运动学模型建立

对双曲柄平面五杆拨禾轮机构的一个拨指进行分析,单个拨指机构的模型如图 2 所示。

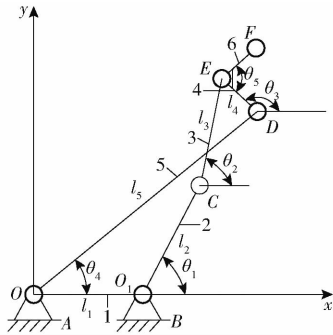


图 2 双曲柄平面五杆拨禾轮机构模型

Fig. 2 Sketch of double crank planar five-bar reel mechanism

1. 机架 2. 短曲柄 3. 长连杆 4. 短连杆 5. 长曲柄 6. 拨禾轮拨指

根据图 2 双曲柄平面五杆拨禾机构模型,建立闭环矢量方程

$$\mathbf{L}_{OB} + \mathbf{L}_{BC} + \mathbf{L}_{CE} = \mathbf{L}_{OD} + \mathbf{L}_{DE} \quad (1)$$

对式(1)闭环矢量方程沿 x 和 y 轴方向分解得

$$\begin{cases} l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 = l_5 \cos \theta_4 + l_4 \cos \theta_3 \\ l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 = l_5 \sin \theta_4 + l_4 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (2)$$

- 式中 θ_1 ——短曲柄与 x 轴向夹角, ($^\circ$)
 θ_2 ——长连杆与 x 轴向夹角, ($^\circ$)
 θ_3 ——短连杆与 x 轴向夹角, ($^\circ$)
 θ_4 ——长曲柄与 x 轴向夹角, ($^\circ$)
 θ_5 ——拨禾轮拨指与短连杆的夹角,为定值
 l_1 ——机架长度, mm
 l_2 ——短曲柄长度, mm
 l_3 ——长连杆长度, mm
 l_4 ——短连杆长度, mm
 l_5 ——长曲柄长度, mm

其中由 x 正向旋转到矢量的矢端为逆时针转动,则该夹角为正,否则为负。

对于双曲柄平面五杆拨禾轮机构的一个拨指端点 F 的轨迹坐标方程,可以分别依据 OE 、 ED 或 BC 、 CE 杆的运动规律求得。

由于杆 OD 和 BC 为同方向等速旋转,因此只要求得 CE 或 ED 杆任意时刻相对水平面的夹角 θ_2 或 θ_3 即可求得拨指端点 F 的轨迹坐标。在求 CE 或

ED 任意时刻相对水平面的夹角 θ_2 或 θ_3 时,由于 OD 、 DE 、 CE 、 CB 和 OB 组成平面五杆机构,因此 θ_2 和 θ_3 要满足

$$\begin{cases} f_1(\theta_2, \theta_3) = l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 + l_1 - l_4 \cos \theta_3 - l_5 \cos \theta_4 \\ f_2(\theta_2, \theta_3) = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 - l_4 \sin \theta_3 - l_5 \sin \theta_4 \end{cases} \quad (3)$$

由于 θ_1 和 θ_4 任意时刻的角度为已知,因此可以采用牛顿-辛普森迭代求解方法求解式(3)中 θ_2 和 θ_3 不唯一性问题^[18-19]。本文选择 BC 、 CE 杆建立的拨指端点 F 在拨禾轮不平移情况下的静态轨迹方程

$$\begin{cases} x_F = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 + l_6 \cos \theta_5 \\ y_F = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_6 \sin \theta_5 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 l_6 为拨禾轮拨指长度,为定值。

设割台前进速度为 v ,则拨指端点 F 随时间 t 变化的动态轨迹方程为

$$\begin{cases} X_F = l_1 + l_2 \cos \theta_1 + l_3 \cos \theta_2 + l_6 \cos \theta_5 + vt \\ Y_F = l_2 \sin \theta_1 + l_3 \sin \theta_2 + l_6 \sin \theta_5 \end{cases} \quad (5)$$

对式(4)和式(5)分别求一阶导数和二阶导数即可得到拨指端点 F 在割台静止及移动条件下速度和加速度方程。

3 双曲柄平面五杆机构拨禾轮设计与运动分析

3.1 拨禾轮结构参数设计

3.1.1 双曲柄平面五杆机构约束条件

双曲柄平面五杆机构的类型取决于 5 个杆的相对长度,同时也与机架及原动件的选取有关^[20-24],从便于传动角度考虑,双曲柄平面五杆机构拨禾轮的 2 个曲柄定为同向等速转动,设双曲柄平面五杆机构拨禾轮的 5 个杆长度分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 ,按二自由度平面五杆机构双曲柄存在的充分条件和统一尺度,取 $l = (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5)/5$,则实际机构尺寸经处理后的相对尺寸分别为: $a_1 = l_1/l$, $a_2 = l_2/l$, $a_3 = l_3/l$, $a_4 = l_4/l$, $a_5 = l_5/l$,则有 $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 5$,由于 5 个杆要构成封闭式运动链,则任一个杆长均不得大于其余 4 个杆长之和,则 5 个杆首先必须满足 $0 < a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 < 2.5$,为保证杆 2 和杆 5 为曲柄,则 5 个杆还需满足条件

$$a_3 + a_4 \leq a_1 + a_2 + a_5 \quad (6)$$

$$|a_3 - a_4| \leq$$

$$\min(|a_1 - a_2 - a_5|, |a_2 - a_1 - a_5|, |a_5 - a_1 - a_2|) \quad (7)$$

3.1.2 双曲柄平面五杆机构拨禾轮结构参数

油菜植株形态呈树状,分枝多且围绕主枝发散

生长^[25],根据油菜的植株特性,拨禾轮的拨指在入禾段,拨指与竖直方向呈现一定倾角,在拨禾轮运动过程中从油菜角果的上方顺着割倒推送的方向压在被割倒后的油菜上,油菜植株与地面倾斜呈一定的角度,拨指要顺着植株倾斜方向快速回撤,此时,拨指不易挑起已割倒的油菜植株。同时如果拨指的回转半径比较大,即“环扣”的高度较高,也可避免拨指阻挡或前推已割倒的油菜植株,避免挂禾和缠绕。根据油菜植株特点及避免拨禾轮拨指挂禾和缠绕的分析结果,构建的双曲柄五杆机构拨禾轨迹如图3所示。

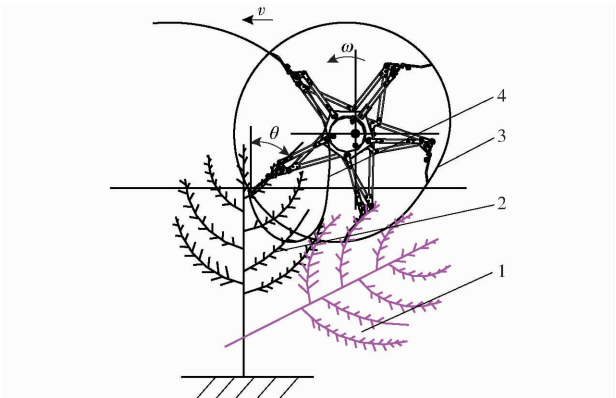


图3 双曲柄五杆机构拨禾轮拨禾过程示意图
Fig.3 Picking up process sketch map of double crank planar five-bar reel mechanism
1. 割倒油菜 2. 直立油菜 3. 静态轨迹 4. 动态轨迹

经调研,我国长江流域油菜株高一般在1 600~2 400 mm,根据种植密度,茎秆直径在10~30 mm,角果层直径400~750 mm。根据割晒机割台尺寸,参考现有油菜割晒机拨禾轮回转半径,初步确定双曲柄平面五杆机构的拨禾轮长连杆的尺寸在1 000~1 100 mm之间,拨禾轮拨指与短连杆的夹角设定为40°。

双曲柄平面五杆机构拨禾轮的参数较多且受杆长条件约束,因此杆长的确定是个难点。根据建立的双曲柄平面五杆机构拨禾轮运动学模型、双曲柄平面五杆机构存在的约束条件和拨禾轮拨指的运动轨迹分析模型,基于Matlab语言编制可视化的轨迹计算与显示软件,通过人机交互的方式,获得满足双曲柄平面五杆机构存在的条件,以及拨禾轮拨指轨迹符合图3轨迹要求的一组参数: $l_1=54\text{ mm}$, $l_2=157\text{ mm}$, $l_3=358\text{ mm}$, $l_4=80\text{ mm}$, $l_5=535\text{ mm}$, $\theta_1=-30^\circ$, $\theta_4=-17^\circ$, $\theta_5=40^\circ$ 。

3.2 拨禾轮运动分析

根据建立的双曲柄平面五杆机构拨禾轮拨指的运动轨迹分析模型,在确定各杆件长度和2个曲柄的起始角度后,拨禾轮拨指的轨迹、速度和加速度还

受短曲柄与x轴向的夹角以及曲柄的旋转速度影响。选择短曲柄与x轴向的夹角 α 分别为 -30° 、 0° 和 30° 进行静态轨迹分析,得到的拨指静态轨迹如图4所示。

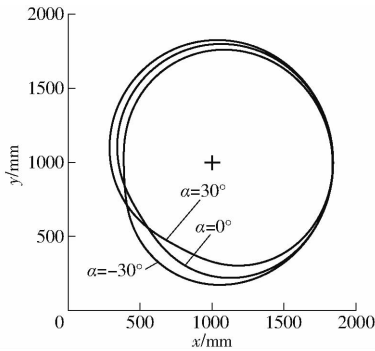


图4 拨禾轮拨指静态轨迹
Fig.4 Static track of reel finger

由图4可见, α 变化对双曲柄五杆机构拨禾轮的拨指轨迹形态没有影响,但轨迹的姿态有变化,轨迹姿态变化导致在垂直方向上轨迹的高度有变化,垂直高度变化会影响拨禾轮拨指的动态轨迹,从而影响拨禾姿态和拨指“环扣”宽度和高度。

设双曲柄平面五杆机构拨禾转速为30 r/min,对 $\alpha=-30^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=30^\circ$ 时拨指尖在水平方向和垂直方向的速度进行分析,拨指尖旋转两周,即4 s时间内沿x轴和y轴向的速度和加速度分别如图5和图6所示。

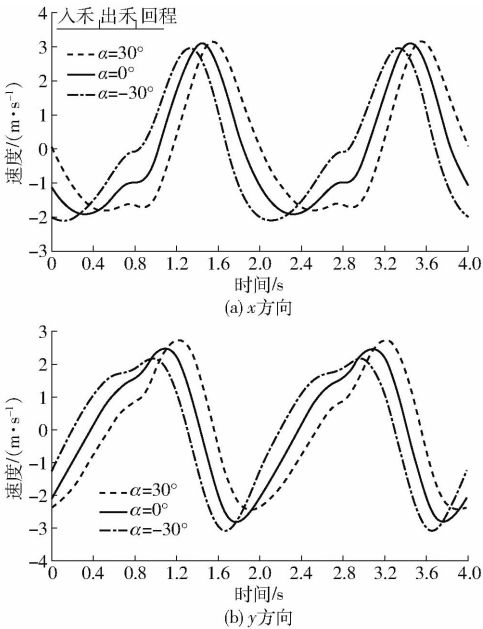


图5 拨禾轮拨指速度变化曲线
Fig.5 Velocity changing curves of reel finger

双曲柄平面五杆机构拨禾轮的2个曲柄按30 r/min匀速转动,由图5和图6可见,拨指在一个转动周期内,速度是起伏变化的,且变化幅度同时受 α 影响。以 $\alpha=0^\circ$ 时的状态为例,在拨指入禾段,即

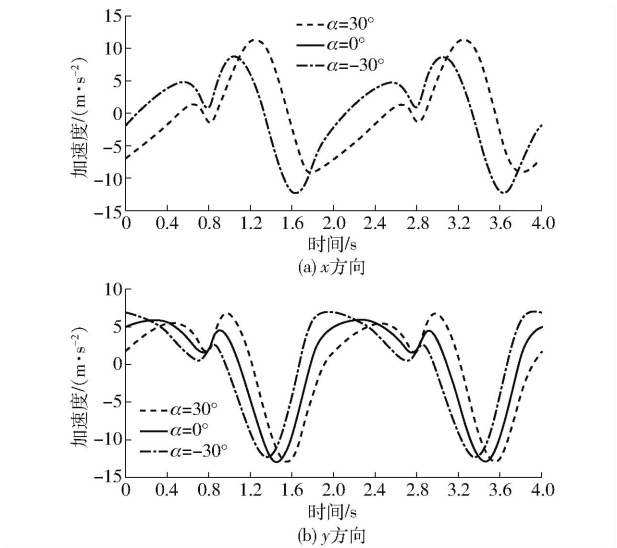


图 6 拨禾轮拨指加速度变化曲线

Fig. 6 Acceleration changing curves of reel finger

拨指从油菜秸秆上方进入阶段,对应的拨禾轮转动时间为 0 ~ 1 s,拨禾轮拨指相对 x 轴正方向,拨指的速度为负值,且速度负值逐渐增大,当达到最大负速度后速度逐渐减小。

假设拨禾轮按 30 r/min, 机具前进速度按 1.1 m/s 作业,拨禾轮拨指入禾的起始点对应 0 s 时刻,拨禾轮拨指尖 x 轴向的速度为 -1.1 m/s,此时拨指尖入禾扶禾时在 x 方向相对机具速度为零,对应的拨指 y 方向速度为负值,即拨指向下运动。拨禾轮拨指拨禾推送和出禾的整个过程拨指 x 方向速度为负值,拨指入禾后向 x 负方向(机具前进的反方向)逐渐增大。当拨禾完成后,拨指 y 方向由负逐渐增大到正值,即拨指从向下运动转为快速上提运动,快速上提运动可避免拨指阻挡油菜向后输送。由图 6 可知,虽然一个运动周期内拨指加速度有突变,但在入禾、扶禾和拨禾段, x 和 y 方向的加速度是逐渐变化的,整个拨禾和拨禾过程加速度无突变,即拨指在入禾、扶禾和推送过程中对油菜穗头的冲击打击少。通过拨禾轮转速和机具前进速度的合理匹配,选择不同的拨禾轮转速适应机具前进速度,可实现拨指 x 方向零速入禾和扶禾,入禾扶禾后逐渐加速向后拨禾,拨禾完成后拨指快速提升出禾。

拨禾轮拨禾扶禾过程是否有向 x 轴反方向即机具前进的反方向的速度,不仅与拨禾轮机构的运动特性有关同时也与机具的前进速度有关。传统偏心式拨禾轮正常工作的必要条件是拨禾速比 $\lambda > 1$,在拨指动态轨迹上直观观察即动轨迹存在“环扣”,常规拨禾轮的拨禾速比 λ 定义为拨禾轮圆周速度和机具前进速度的比值。由于双曲柄平面五杆机构拨禾拨指在一个转动周期内速度是变化的,为了定义双曲柄平面五杆机构拨禾轮的拨禾速比,分别以拨

禾轮轴为中心的拨禾轮拨指静态轨迹最小内接圆半径、长曲柄杆长以及拨指尖距拨禾轮轴中心的最大距离等 3 个长度,求取拨禾轮匀速圆周转动时 3 个长度顶端处的圆周线速度与机具前进速度的比值,作为双曲柄五杆机构拨禾的拨禾速度比进行分析。

对于本文设计的双曲柄平面五杆机构拨禾轮,拨指尖以拨禾轮轴为中心的静态轨迹最小内接圆半径 L_1 为 615 mm,长曲柄杆长 l 为 535 mm,拨指尖距拨禾轮轴中心的最大距离 L_2 为 841 mm。设拨禾轮转速 30 r/min,分别以机具前进速度,与 3 个长度为半径的圆周线速度比值等于 1, $\alpha = 0^\circ$ 时进行拨指动态轨迹分析,则此时机具对应的前进速度 v 分别为 1.929、1.680、2.641 m/s。不同机具前进速度下的拨指尖动态轨迹如图 7 所示。

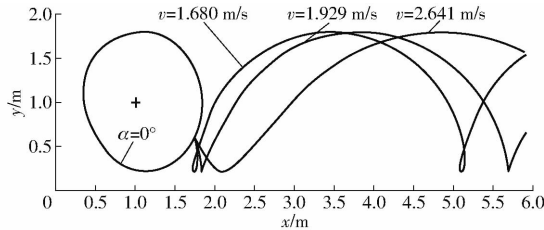


图 7 拨指尖动态运动轨迹

Fig. 7 Dynamic trajectory of reel finger top

由图 7 可见,当机具前进速度 $v = 1.929$ m/s,拨禾轮转速为 30 r/min,此时 L_1 为 615 mm 时计算得到拨指尖的圆周线速度也为 1.929 m/s。拨指尖的动态轨迹此时正处于有“环扣”和无“环扣”的临界状态。按机具其他速度运动,另外 2 种状态下的拨指尖静态轨迹已存在“环扣”或完全不存在“环扣”。

对 α 取 -30° 、 0° 、 30° , 机具前进速度 v 分别为 1.929、1.680 m/s 的拨指尖运动动态轨迹进行分析,结果如图 8 所示。

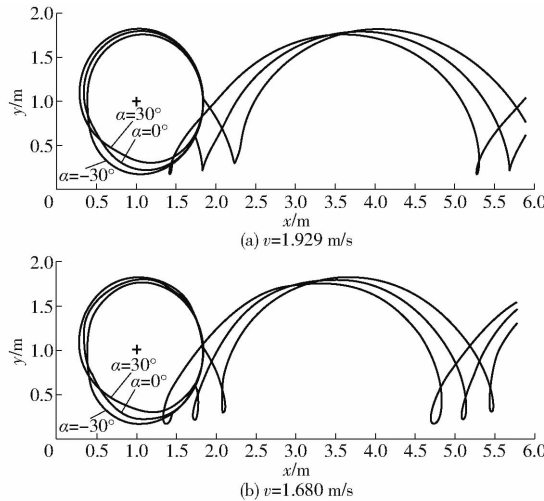


图 8 不同机具速度的拨指尖动态轨迹

Fig. 8 Dynamic trajectory of reel finger top at different machinery moving speed

由图 8 可见, $v = 1.929\text{ m/s}$, $\alpha = -30^\circ$ 的状态, 动态轨迹也存在小“环扣”现象, 但环扣比较小。当 $v = 1.680\text{ m/s}$, 即拨禾轮线速比 λ 大于 1 时, α 在 3 种状态下, 拨指尖的动态轨迹均存在“环扣”。因此, 对于双曲柄平面五杆机构拨禾轮, 在选择拨禾轮转速和机具前进速度匹配关系时, 可以以拨禾轮匀速转动时拨禾轮轴为中心的拨指尖静态轨迹最小内接圆半径为长度的圆周线速度来近似计算双曲柄平面五杆机构拨禾的拨禾轮线速度比。

选定双曲柄平面五杆机构拨禾轮的回转半径和偏心式拨禾轮拨禾的回转半径相同, 2 种拨禾轮的圆周线速度和机具前进速度的拨禾速比 $\lambda = 2.2$ 时进行运动轨迹分析, 结果如图 9 所示。

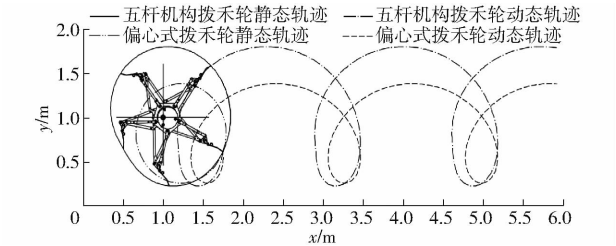


图 9 拨禾轮拨指尖轨迹对比

Fig. 9 Track comparison diagram of reel finger top

由图 9 可见, 在相同回转半径条件下, 双曲柄平面五杆机构拨禾轮拨指尖的静态轨迹回转半径更大, 原因是偏心式拨禾轮拨指转动周期内拨指全程姿态不变, 双曲柄平面五杆机构拨禾轮拨指回转周期内姿态是时刻变化的, 在出禾段拨指向上提升翻转, 因此拨指尖的回转半径大, 回转半径最低点和最高点距离大, 拨指不易阻挡油菜导致拨指阻挡挂禾。对比 2 种拨禾拨指尖的动态轨迹, 在相同回转半径和拨禾速比下, 双曲柄平面五杆机构拨禾轮拨指尖运动轨迹的“环扣”相比偏心拨禾轮拨指运动轨迹的“环扣”更高, 宽度更大, “环扣”大则在满足同样拨禾要求条件下, 双曲柄平面五杆机构拨禾的转速相对偏心式拨禾转速可以更低, 拨指尖线速度低能有效减少拨指对油菜穗头的打击, “环扣”高度大也能减少拨指对已割倒油菜的阻挡, 避免拨指挂禾和缠绕。

4 田间试验

为了验证设计的双曲柄平面五杆机构拨禾轮在高大、分枝多油菜拨禾过程中的拨禾性能, 试验于 2020 年 9 月 15—17 日在甘肃省张掖市民乐县永固镇进行, 选取高大、分枝多的油菜田开展试验。油菜割晒机分别配置双曲柄平面五杆机构拨禾轮和偏心式拨禾轮进行田间割晒拨禾性能试验。油菜品种为甘油杂 1 号, 种植方式为机械直播, 油菜种植密度

3 株/ m^2 , 植株平均高度 1.62 m, 底荚高度 0.86 m, 角果层直径 0.61 m, 无倒伏, 割晒作业时油菜茎秆含水率 76.45%, 籽粒含水率 37.74%, 千粒质量 3.52 g。

采用对比试验的方法, 割晒铺放过程中, 影响铺放质量的因素较多, 如输送带速度、割茬高度、拨禾轮转速、拨禾位置等。在相同的作物田间状态, 割台输送带速度、拨禾位置、割茬高度等试验条件下, 如果拨禾轮存在挂禾和缠绕现象, 则会牵扯其他已割倒的油菜, 导致油菜的铺放姿态和角度发生变化。因此本文以相同的试验条件和工作参数, 通过铺放角度和铺放角度差以及是否发生拨禾轮缠绕作为对比评价指标, 分别采用配置双曲柄平面五杆机构拨禾轮的割晒机和配置偏心式拨禾轮的油菜割晒机进行割晒拨禾试验, 在相同的田块和油菜状态条件、地势平坦、油菜长势均匀, 田间无杂草, 风力不大于 3 m/s 的情况下进行试验, 每次作业长度不小于 30 m, 重复 3 次。

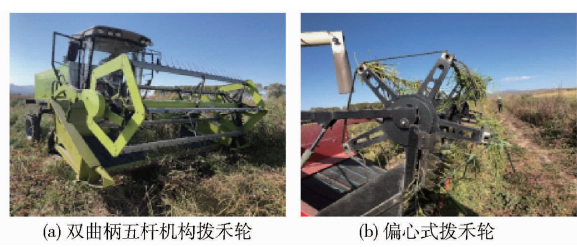
参考标准 JB/T 7733—2007《割晒机 技术条件》和 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》测量割晒作业的铺放角度和铺放角度差等指标, 为避免割晒机一侧由于竖割刀分行等对割晒铺放姿态和角度的影响, 选取无分行竖割刀一侧测量铺放角度和铺放角度差。具体测量方法为: 将皮卷尺平行固定于铺放条上, 每隔 2 m 选取 1 m 的测试区, 利用角度尺测量测试区内油菜主茎秆与皮卷尺的夹角, 记录数据并求平均值。则油菜植株铺放角为每个测区内铺放角的平均值, 角度差为 10 次测量角度最大值和最小值的差。

割茬高度 15 cm, 机具前进速度设为 1.1 m/s, 割晒机输送带速度 2 m/s, 拨禾轮旋转轴距离割刀高度 1 m, 2 种类型拨禾轮的转速分别按 30、35、40 r/min 进行对比试验, 对比试验结果如表 1 所示, 2 种拨禾轮田间缠绕对照情况如图 10 所示。

表 1 试验结果对比
Tab. 1 Comparison of test results (°)

拨禾轮转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	双曲柄平面五杆 机构拨禾轮割晒机		偏心式拨禾轮割晒机	
	铺放角度	角度差	铺放角度	角度差
30	25.0	8.0	37.9	15.0
35	24.1	7.0	35.2	14.0
40	23.2	6.0	35.8	16.0

对表 1 数据按两因素独立观测值进行方差分析。铺放角度方差分析结果表明, 拨禾轮转速对铺放角度的影响不显著 ($P = 0.165 > 0.1$), 2 种拨禾轮的差异对铺放角度的影响极显著 ($P = 0.002 <$



(a) 双曲柄五杆机构拨禾轮 (b) 偏心式拨禾轮

图 10 油菜割晒机两种拨禾轮缠绕情况对比

Fig. 10 Entanglement comparison of two rape windrower

0.05)。铺放角度差方差分析表明,拨禾轮转速对铺放角度差的影响不显著($P=0.750>0.1$),2种拨禾轮的差异对铺放角度差的影响显著($P=0.015<0.1$)。田间试验发现,双曲柄平面五杆机构拨禾轮全程未出现拨禾轮挂禾和缠绕现象,对照偏心式拨禾轮挂禾缠绕严重,从表1也可发现,2种拨禾轮对割晒铺放角度和角度差的影响均达到显著水平,分析主要原因是拨禾轮挂禾缠绕等会牵扯其他油菜,从而影响铺放角度和角度差。对于双曲柄平面五杆机构拨禾轮,随着拨禾轮转速增加,铺放角度和角度差有减少的趋势,但未达到显著水平,对于偏心式拨禾轮,随着转速增加,铺放角度和角度差并没有减

少的趋势,分析原因主要是拨禾轮牵扯缠绕等因素的影响较拨禾轮转速的影响大。

5 结论

(1)设计了一种双曲柄平面五杆机构油菜割晒机拨禾轮,建立了该机构的运动分析模型,开展了拨禾轮拨指运动特性及轨迹分析,得到了不同参数对拨禾轮拨指运动轨迹和运动特性的影响规律。

(2)确定了一组双曲柄平面五杆机构拨禾参数: $l_1=54\text{ mm}$ 、 $l_2=157\text{ mm}$ 、 $l_3=358\text{ mm}$ 、 $l_4=80\text{ mm}$ 、 $l_5=535\text{ mm}$ 、 $\theta_1=-30^\circ$ 、 $\theta_4=-17^\circ$ 、 $\theta_5=40^\circ$,该组参数下拨禾轮拨指可以实现入禾段扶禾速度低,拨禾段速度逐渐加速,出禾段快速上提翻转脱离,与偏心式拨禾轮相比,同等回转半径和转速下,拨禾齿“环扣”高度高,宽度大,能有效避免高大分枝多油菜的挂禾和缠绕等问题。

(3)两因素田间对比试验结果表明,双曲柄平面五杆机构拨禾轮和偏心式拨禾轮的转速变化对铺放角的影响不显著,但对铺放角度差的影响分别达到极显著和显著水平。

参 考 文 献

[1] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[2] 杨毅,李耀明,青苡任. 油菜联合收获机拨禾轮的入禾轨迹分析与试验[J]. 农机化研究,2020,42(10):189-194.
YANG Yi, LI Yaoming, QING Yiren. Insertion trajectory analysis and experiment of rape combine harvester reel[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(10):189-194. (in Chinese)

[3] 廖庆喜. 油菜生产机械化技术[M]. 北京:科学出版社,2018.

[4] 王进华,王泽群,贾晶霞,等. 饲料收获机矮杆割台拨禾轮导轨运动轨迹研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):152-155.
WANG Jinhua, WANG Zequn, JIA Jingxia, et al. Guide rail trajectory of mower table reel device for silage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 152-155. (in Chinese)

[5] 李海同,吴崇友,沐森林,等. 基于 ANSYS-ADAMS 的油菜割晒机铺放角形成机理研究[J]. 农业工程学报,2020,36(14):96-105.
LI Haitong, WU Chongyou, MU Senlin, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS-ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14):96-105. (in Chinese)

[6] 吴崇友. 油菜机械化收获技术[M]. 镇江:江苏大学出版社,2017.

[7] 吴崇友,王积军,廖庆喜,等. 油菜生产现状与问题分析[J]. 中国农机化学报,2017,38(1):124-131.
WU Chongyou, WANG Jijun, LIAO Qingxi, et al. Current status and problems of rapeseed production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 124-131. (in Chinese)

[8] 张敏,金诚谦,梁苏宁,等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(24):8-15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 8-15. (in Chinese)

[9] 金诚谦,尹文庆,吴崇友. 油菜割晒机拨指输送链式输送装置研制与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(21):11-18.
JIN Chengqian, YIN Wenqing, WU Chongyou. Development and experiment of rape windrower transportation device with poke finger conveyor chain[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 11-18. (in Chinese)

[10] 李平,廖庆喜,李磊,等. 4SY-1.8改进型油菜割晒机主要装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(1):53-58.
LI Ping, LIAO Qingxi, LI Lei, et al. Design and experiment of the main device of 4SY-1.8 modified rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 53-58. (in Chinese)

[11] 金诚谦,吴崇友,金梅,等. 4SY-2型油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(10):76-79.
JIN Chengqian, WU Chongyou, JIN Mei, et al. Design and experiment of 4SY-2 rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 76-79. (in Chinese)

[12] 金诚谦,尹文庆,吴崇友. 4SY-2型油菜割晒机铺放质量数学模型与影响因素分析[J]. 农业工程学报,2011,27(11):45-48.
JIN Chengqian, YIN Wenqing, WU Chongyou. Mathematical model and influencing factors analysis for windrow quality of 4SY-2 rape windrower[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 45-48. (in Chinese)

[13] 廖宜涛,陈传节,舒彩霞,等. 4SY-1.8型手扶式油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊):94-100.

- LIAO Yitao, CHEN Chuanjie, SHU Caixia, et al. Design and experiment of 4SY-1.8 rape walking windrower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 94-100. (in Chinese)
- [14] 王修善, 刘大为, 李旭, 等. 4SY-2.0 型自走式油菜割晒机的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 445-453.
- WANG Xiushan, LIU Dawei, LI Xu, et al. Design and experiment of 4SY-2.0 self-propelled rape windrower[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Science), 2016, 42(4): 445-453. (in Chinese)
- [15] 石增祥, 谢伟, 任述光, 等. 4SY-2.2 型油菜割晒机设计与试验[J]. 中国农学通报, 2017, 33(10): 140-145.
- SHI Zengxiang, XIE Wei, REN Shuguang, et al. Design and test of 4SY-2.2 rape windrower[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(10): 140-145. (in Chinese)
- [16] 刘科. 油菜中间输送割晒装置的设计与试验[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- LIU Ke. Design and experiment of intermediate conveying windrow device for rape[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [17] 廖庆喜, 刘明峰, 张赵, 等. 油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 49-55.
- LIAO Qingxi, LIU Mingfeng, ZHANG Zhao, et al. Multi-objective optimization design of double five-bar transplanting mechanism for rape pot seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 49-55. (in Chinese)
- [18] 约翰·F·加德纳. 机构动态仿真——使用 MATLAB 和 SIMULINK[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [19] 于红英, 唐德威, 王建宇. 平面五杆机构运动学和动力学特性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6): 940-943.
- YU Hongying, TANG Dewei, WANG Jianyu. Analysis of the kinematic and dynamic characteristics of a planar five-bar mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(6): 940-943. (in Chinese)
- [20] 王锡霖, 严日明, 李举, 等. 基于 MATLAB 的平面五连杆机构的运动分析[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(32): 273-277.
- WANG Xilin, YAN Riming, LI Ju, et al. Kinematic analysis of planar five-bar mechanism based on MATLAB[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 32(32): 273-277. (in Chinese)
- [21] 曲秀全. 基于 MATLAB/Simulink 平面连杆机构的动态仿真[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [22] 夏定玲. 双自由度五杆机构的轨迹综合及优化设计研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- XIA Dingling. The research of trajectory synthesis and optimal design of two-DOF planar five-bar linkage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [23] 吴崇友, 金诚谦, 肖体琼, 等. 我国油菜全程机械化现状与技术影响因素分析[J]. 农机化研究, 2007, 29(12): 207-210.
- WU Chongyou, JIN Chengqian, XIAO Tiqiong, et al. Analysis on rape mechanization present situation and technical affection factors in whole productive course in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(12): 207-210. (in Chinese)
- [24] ZHANG Min, WU Chongyou, JIN Mei, et al. Effects of harvesting method and date on yield loss and seed quality of rapeseed[J]. Oil Crop Science, 2019, 4(3): 166-174.
- [25] MA Ni, ZHANG Chunlei, LI Jun, et al. Mechanical harvesting effects on seed yield loss, quality traits and profitability of winter oilseed rape (*Brassic napus* L.)[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(8): 1297-1304.

(上接第 114 页)

- [23] 崔功佩, 王京峥, 文双涛, 等. 采后甘蓝单体排序定向输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 351-360.
- CUI Gongpei, WANG Jingzheng, WEN Shuangtao, et al. Design and test of monomer sorting and orientational conveying device for postharvest cabbage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 351-360. (in Chinese)
- [24] 车刚, 陈正发, 王鑫, 等. 自主转送式杂粮含水率快速测定仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 357-366.
- CHE Gang, CHEN Zhengfa, WANG Xin, et al. Design and experiment on autonomous transferring and quick measuring equipment of moisture content of coarse cereals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 357-366. (in Chinese)
- [25] CHOI W C, KIM D C, RYU H L, et al. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 13-19.
- [26] 高国华, 王凯, 孙晓娜. 嫁接机钢针顶起穴盘苗过程 EDEM 模拟验证及参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 29-35.
- GAO Guohua, WANG Kai, SUN Xiaona. Verification for EDEM simulation of process of jacking tray-seedling by steel needle in grafting machine and parameter optimization[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(21): 29-35. (in Chinese)
- [27] 潘杰. 手扶式蔬菜穴盘苗自动移栽机设计及关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- PAN Jie. Design and key technology research of hand-held vegetable tray seedling automatic transplanting machine[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
- [28] 高国华, 谢海峰, 王天宝. 设施蔬菜收获机拉拔力学性能 EDEM 仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 24-31.
- GAO Guohua, XIE Haifeng, WANG Tianbao. EDEM simulation and experiment of pullout force of protected vegetable harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 24-31. (in Chinese)