

油菜联合收获机梳脱式割台设计

冀牧野¹ 廖庆喜^{1,2} 李海同¹ 万星宇¹ 王 华¹ 赵颖彪¹

1.华中农业大学工学院,武汉 430070; 2.南方粮油作物协同创新中心,长沙 410128

摘要 针对油菜植株生物学特性和成熟期果荚易炸裂的特点,设计一种油菜联合收获机的梳脱式割台。通过建立梳脱滚筒、拨禾轮等部件的运动学模型,确定拨禾轮、梳脱滚筒、切割装置和防飞溅罩壳的结构参数和运动参数,确定合理的参数组合,并开展梳脱滚筒运动仿真分析。结果表明,梳脱弹指间距为70 mm,弹指轴向倾角小于82°时,可以实现梳脱元件地面投影对作物完全覆盖;当机组前进速度为0.4~1.8 m/s时,为达到较好的梳脱效果,对应的拨禾轮转速和梳脱滚筒转速分别为20~30、220~270 r/min,且二者的水平距离应大于374 mm。仿真和田间试验表明,梳脱式割台可以实现油菜收获的拨禾、梳脱、抛送、切割等功能。

关键词 农业机械; 油菜; 油菜收获机; 联合收获; 梳脱式割台; 结构设计

中图分类号 S 225.99 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2016)05-0117-08

油菜是中国重要的油料作物。目前,油菜的主要收获方式有人工收获、机械分段收获和联合收获。其中,联合收获能一次性完成收割、脱粒、分离、清选、秸秆还田等工序,生产效率高^[1]。目前,常见的油菜联合收获机一般是在较为成熟的全喂入稻麦联合收获机的基础上进行改装,包括增加主动分禾装置,延长割台面,调整拨禾轮的高度和前后位置等^[2-5]。由于油菜茎秆高粗且草谷比较大,全喂入油菜联合收获机将茎秆全部喂入收获机中,容易缠绕及堵塞工作部件,增加功耗^[6-8]。联合收获一般在油菜八成熟时进行,因干枯的果荚易炸裂。果荚炸裂后油菜籽粒一部分掉落在割台范围外造成落粒损失,另一部分掉落在割台范围内的籽粒不能进入后续的脱粒分离和清选工序,需要人工回收。梳脱式收获是利用旋转的梳脱元件,将油菜果荚和分枝从主茎秆上梳刷下来,回收脱下物料并送入后续的脱粒分离和清选装置^[9]。目前,梳脱式收获主要应用于水稻、小麦、辣椒等农产品的收获作业中^[10-14]。4ZTL-1800型割前摘脱稻麦联合收获机可实现稻麦的梳脱、气流输送、复脱、清选、切割等功能,可靠性好,损失率低,是国内梳脱式联合收获机的代表机型^[15-16]。胡爽吉^[17]研制的弹齿滚筒式辣椒采摘机,利用梳脱式收获原理,可以一次性完成辣椒的进给、

采摘、输送、收集等功能,显著提高了辣椒的采摘效率。

为提高油菜联合收获机的适应性,针对油菜植株生物学特性和成熟期果荚易炸裂的特点,笔者将梳脱式收获原理运用于油菜联合收获中,研制一种油菜联合收获机梳脱式割台。梳脱式割台仅梳脱、收集油菜的分枝和果荚,油菜主茎秆不喂入割台,从而避免由于主茎秆喂入而导致的输送堵塞;同时,降低喂入物料的草谷比,降低脱粒分离和清选装置的工作负荷和功耗;梳脱滚筒旋转产生的气流可以将部分炸荚掉落的籽粒回收进割台,减少落粒损失。梳脱式割台为油菜联合收获机结构设计提供了新思路。

1 结构设计

1.1 整机结构与工作原理

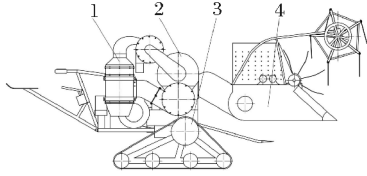
1) 整机结构。梳脱式油菜联合收获机由梳脱式割台、复脱装置、旋风分离清选系统和行走系统组成。整机结构如图1所示。其中,梳脱式割台主要包括割台架、拨禾轮、梳脱滚筒、横向螺旋推送器、分禾器、罩壳、刮板输送机、切割装置和传动系统。梳脱式割台结构如图2所示。

收稿日期: 2015-11-02

基金项目: 国家油菜产业体系专项(CARS-13); “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD08B02); 中央高校基本科研业务费专项(2662015PY133)

冀牧野, 硕士研究生, 研究方向: 现代农业装备设计与测控. E-mail: 281977937@qq.com

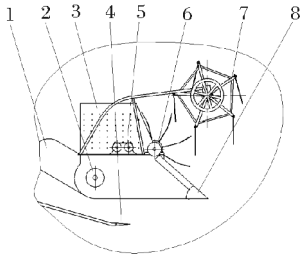
通信作者: 廖庆喜, 博士, 教授, 研究方向: 现代农业装备设计与测控. E-mail: liaoxq@mail.hzau.edu.cn



1. 旋风分离清选系统 Cyclone separating cleaning system; 2. 复脱装置 Threshing unit; 3. 行走系统 Running system; 4. 梳脱式割台 Stripping cutting table.

图 1 梳脱式油菜联合收获机结构简图

Fig.1 Structure sketch of stripping rape combine harvester



1. 刮板输送机 Scraper conveyor; 2. 横向螺旋推送器 Horizontal conveyor; 3. 防飞溅罩壳 Cover casing; 4. 切割装置 Cutting unit; 5. 换向齿轮箱 Gear box; 6. 梳脱滚筒 Stripping drum; 7. 拨禾轮 Reel slat; 8. 分禾器 Nearside divider.

图 2 梳脱式割台结构简图

Fig.2 Structure sketch of stripping cutting table

油菜联合收获机作业时,梳脱式割台对油菜茎秆进行拨禾、梳脱,并将梳下物料抛送、收集,送入复脱装置和旋风分离清选系统;切割装置将被梳脱后的茎秆切断。

2)工作原理。设油菜主茎秆为弹性悬臂梁,自然状态下呈直立状态。根据收获过程中油菜茎秆的不同状态,梳脱作业可以分为 3 个阶段:喂入阶段、梳脱阶段、抽离阶段。喂入阶段,拨禾轮拨指垂直入禾,将油菜向后拨倒,使油菜的角果层完全处于割台内部。同时,割台前支撑端给油菜主茎秆施加支撑力,使待收油菜以一定区间范围内的倒伏角度进入割台。梳脱阶段,梳脱元件插入已进入割台的油菜角果层中。梳脱滚筒旋转方向与机组前进方向相反,梳脱元件和油菜产生相对运动,自下而上梳刷油菜全部角果层。梳刷下的果荚、籽粒和分枝在梳脱元件的打击力和惯性作用下向后抛送,同时,梳脱滚筒快速旋转产生的气流场起到辅助抛送的作用。物料经过横向螺旋推送器和刮板输送机依次进入到复脱装置和旋风分离清选系统中。防飞溅罩壳可以防止梳脱下来的果荚和籽粒抛送过高,减少飞溅损失。抽离阶段,随着机组的前进,被梳脱后的油菜在茎秆

根部的拉力作用下从割台内抽离。抽离的油菜主茎秆与切割装置接触并产生相对运动,主茎秆被切断并平铺在田间。

1.2 梳脱式割台关键部件设计

1)拨禾轮参数设计。梳脱式割台的拨禾轮具有辅助梳脱的作用,与传统割台的拨禾轮相比,对推送功能要求较低,而对扶持功能要求更高。为了保证梳脱式割台的梳脱效果,依据梳脱式割台的工作原理,梳脱滚筒梳脱油菜的过程中,拨禾轮应将油菜向后拨倒,使油菜的角果层完全处于割台内部。因此,在保证拨禾轮速比 $\lambda > 1$ 的同时^[18-20],拨禾轮在设计和使用过程中必须满足一定的结构参数和运动参数。由于油菜茎秆自身存在回复力,即失去拨禾轮的向后拨倒力后就会自然恢复直立状态。因此,只有油菜始终受到向后的拨倒力时,才能保证油菜处于割台内部,即拨禾轮上作用点位于摆线轨迹环扣最长弦以下。此外,油菜需要在割台内滞留足够的时间,该时间内拨倒力需要持续作用,才能保证梳脱滚筒充分地梳刷。

当机组前进速度为 v_m ,拨禾轮以角速度 ω 旋转时,拨禾轮圆周速度为 v_s ,其上任意一点的运动方程如下:

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos \omega t \\ y = h + R \sin \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 、 y 为拨禾杆上任意一点水平和竖直方向的坐标。 v_m 为机组的前进速度, m/s; R 为该点到拨禾轮轴心的距离, m; ω 为拨禾轮的角速度, rad/s; h 为拨禾轮中心离地高度, m。

设油菜被梳脱滚筒打击 q 次能被充分梳脱,梳脱滚筒的转速为 n ,则所需要的时间 t_q 为:

$$t_q = \frac{15q}{2n} \quad (2)$$

对轨迹方程(1)求导,得到速度方程

$$\begin{cases} v_x = v_m - R\omega \sin \omega t \\ v_y = R\omega \cos \omega t \end{cases} \quad (3)$$

当拨禾轮上的点位于摆线环扣最长弦的两端时,水平方向上的速度为 0,即 $v_x = 0$ 。设最长弦的一端为起始位置,则轨迹运行到最长弦另一端的时间点为:

$$t_b = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{v_m}{R\omega} \quad (4)$$

式中, $0 < t_b < \frac{2\pi}{\omega}$ 。为保证梳脱滚筒有充分的时间尽可能将油菜梳脱干净,须保证 $t_b > t_q$,即

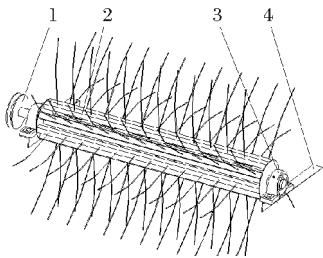
$$\frac{1}{\omega} \arcsin \frac{v_m}{R\omega} > \frac{15q}{2n} \quad (5)$$

由式(5)可知,拨禾轮半径越大,摆线环扣的最长弦越长,对油菜的拨倒时间越长,梳脱效果越好。但是,拨禾轮尺寸过大会导致整机尺寸增大,影响整机的重心位置和田间通过性。将 $\lambda = v_s/v_m, v_s = R\omega$ 代入式(5),得到

$$\frac{1}{\omega} \arcsin \frac{1}{\lambda} > \frac{15q}{2n} \quad (6)$$

由式(6)可知,当 λ 过大时,作物在梳脱过程中由于自身的回复力会产生多次回弹,影响梳脱效果;油菜所需的梳刷次数 q 与油菜生长状况及梳脱元件的形式有关。设计中,根据试验田中油菜的生长情况,拨禾轮转速的变化范围为 20~30 r/min。

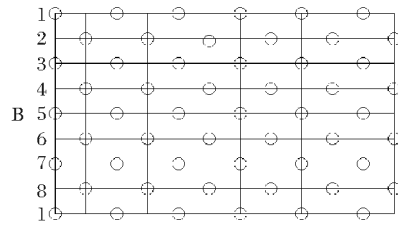
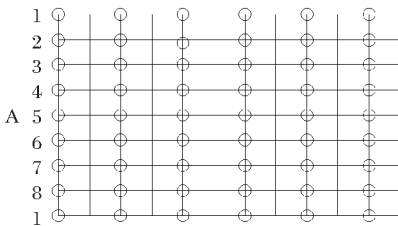
2)梳脱滚筒结构与参数设计。梳脱滚筒是梳脱式割台的核心部件,不仅影响梳脱的梳净率和损失率,且对整机的工作效率、清选质量都有很大的影响。梳脱滚筒主要包括带轮、梳脱弹指、支撑轴承、支架等,其结构如图 3 所示。



1.带轮 Belt wheel; 2.梳脱弹指 Stripping finger; 3.轴承 Bearing; 4.支架 Bracket.

图 3 梳脱滚筒结构简图

Fig.3 Structure sketch of stripping drum



A:对齐安装展开图 Expansion graph of finger aligned arrangement; B:交错安装展开图 Expansion graph of finger interlaced arrangement.

图 4 梳脱弹指安装方式展开图

Fig.4 Expansion graph of finger arrangement

当 $B_z < s_z$ 时,会发生漏梳,如图 5A 所示,设漏梳率为 r_1 ,则

$$e_1 = \left[1 - \frac{n_z l_z \cos \alpha}{(n_z - 1) s_z} \right] \times 100\% \quad (10)$$

当 $B_z > s_z$ 时,会发生重梳,如图 5B 所示,设重

常见的梳脱元件有板齿式、弓齿式、弹指式等。板齿式梳脱元件齿间距不可调,适用于稻麦等茎秆直径差异小的作物;弓齿式梳脱元件的抛送效果较差,一般需要吸运风机配合输送,适用于大型收获机。由于油菜主茎秆直径差异较大、分枝多,因此,选用弹指式梳脱元件。设油菜种植行距为 a ,角果层半径为 r_j ,底荚处主茎秆直径为 d_j ;对于梳脱滚筒,设每排有 n_z 个梳脱弹指,指间距为 s_z ,割台幅宽为 d_g 。则每排的弹指数量为 $d_g/s_z - 1$ 。为防止油菜主茎秆卡在相邻两弹指之间,需

$$s_z > d_j \quad (7)$$

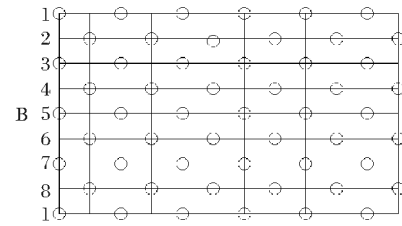
设相邻 2 行油菜之间拨指的投影数量为 n_t 。 n_t 对油菜的梳净率影响较大, n_t 越大,梳净率越高。

$$n_t = \frac{d_g/s_z - 1}{d_g/a} \quad (8)$$

为了保证梳脱效果,相邻 2 行油菜之间至少有 1 条以上的拨指投影,即 $n_t > 1$ 。式(7)和(8)确定了每排梳脱弹指间距的最大值和最小值。本设计中,根据油菜的生长情况,弹指间距取 $s_z = 70 \text{ mm}$;割台幅宽为 900 mm,则轴向弹指数量取 12 根。设梳脱弹指的有效伸出长度为 l_z ,弹指与滚筒轴的夹角为 α 。梳脱滚筒转速与前进速度的比值 λ 较大,因此,弹指梳脱轨迹在水平面上的投影可以近似为一个矩形,矩形的长度为机组的前进距离,设矩形的宽度为 B_z ,则

$$B_z = l_z \cos \alpha \quad (9)$$

在梳脱弹指对齐安装的情况下,安装方式如图 4A 所示。



在梳脱弹指交错安装的情况下,安装方式如图 4B 所示,当 $2B_z < s_z$ 时,会发生漏梳,设漏梳率为

$$r_1 = \left[\frac{n_z l_z \cos \alpha}{(n_z - 1) s_z} - 1 \right] \times 100\% \quad (11)$$

e_2 , 则

$$e_2 = \left[1 - \frac{2n_z l_z \cos \alpha}{(n_z - 1) s_z} \right] \times 100\% \quad (12)$$

当 $2B_z > s_z > B_z$ 时, 会发生重梳, 此时重梳是由于奇数排弹指与偶数排弹指梳脱轨迹在水平面上的投影发生重叠, 设重梳率为 r_2 , 则

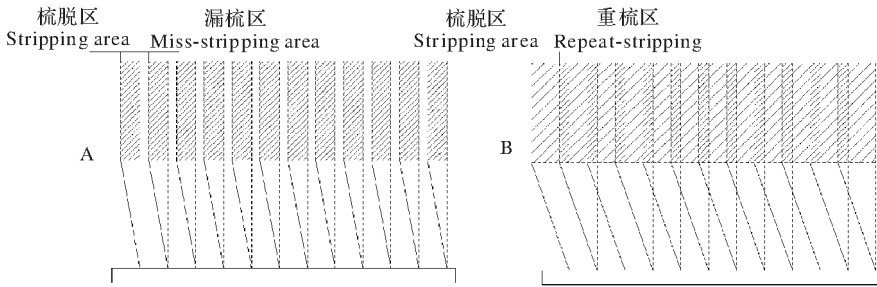
$$r_2 = \left[\frac{2n_z l_z \cos \alpha}{(n_z - 1) s_z} - 1 \right] \times 100\% \quad (13)$$

当 $B_z > s_z$ 时, 重梳率进一步升高, 此时重梳率是由于奇数排弹指与偶数排弹指梳脱轨迹在水平面

上的投影发生重叠以及同排弹指梳脱轨迹在水平面上的投影发生重叠 2 个因素造成的。可见, 在梳脱弹指交错安装且 $2B_z > s_z > B_z$ 时容易兼顾重梳率和漏梳率。为保证不发生漏梳, 根据式(13)可得

$$0 < \alpha < \arccos \frac{(n_z - 1) s_z}{2n_z l_z} \quad (14)$$

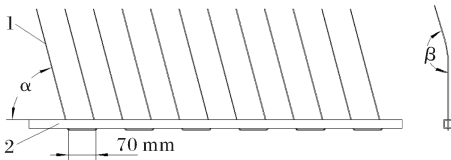
代入参数, 得到 $\alpha < 82^\circ$ 。为使抛送时物料有合理的抛送角度, 减少飞溅损失, 弹指应有一定的弯折角度 β , 如图 6 所示。 β 值与抛送物料的运动方程有关, 将在下文进行分析。梳脱弹指采用可拆卸、密度



A: 漏梳区示意图 Schematic diagram of miss-stripping area; B: 重梳区示意图 Schematic diagram of repeat-stripping area.

图 5 漏梳区和重梳区示意图

Fig.5 Schematic diagram of miss-stripping area and repeat-stripping area



1. 弹指 Finger; 2. 支撑架 Bracket.

图 6 梳脱元件

Fig.6 Stripping unit

可调的设计, 可根据不同的油菜品种、不同的生长情况选择合适的弹指数量和指间距。

为保证梳脱效果, 需确定梳脱滚筒转速与机组前进速度的关系。如图 7 所示, c 点处油菜刚刚进入割台, a 点处油菜恰好从梳脱滚筒的范围内抽离,

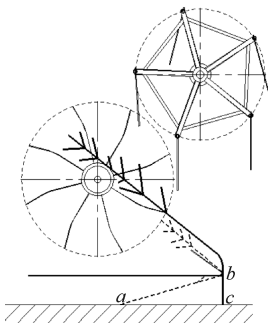


图 7 物料喂入和抽离过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of feeding and extracting

b 点是割台前支撑端与油菜主茎秆的接触点, 3 点构成 1 个直角三角形。

设油菜的平均株高为 L , 底茎高度为 h_d , 机组的前进速度为 v_m , 割台底的离地高度为 h_3 , 油菜由 bc 状态变化到 ac 状态所需时间为 t_j , 则

$$\begin{cases} l_{ab} = L - h_d + l_{bc} \\ l_{ac} = v_m t_j \\ l_{bc} = h_3 \\ l_{ab}^2 = l_{ac}^2 + l_{bc}^2 \end{cases} \quad (15)$$

解方程(15)得

$$t_j = \frac{\sqrt{(L - h_d + h_3)^2 - h_3^2}}{v_m} \quad (16)$$

油菜充分梳脱所需时间为 t_q , 为保证梳脱效果, 需保证 $t_j > t_q$, 代入方程(2)和(16)得

$$\frac{\sqrt{(L - h_d + h_3)^2 - h_3^2}}{v_m} > \frac{15q}{2n} \quad (17)$$

式(17)中, q 为油菜梳脱干净需要被梳刷的次数; n 为梳脱滚筒转速, r/min 。式(17)给出了在梳脱式割台结构参数一定的条件下, 梳脱滚筒转速和机组前进速度应根据油菜植株特性调整二者的匹配关系。本设计中, 当 $1.8 \text{ m/s} \geq v_m \geq 0.4 \text{ m/s}$ 时, 梳脱滚筒的转速变化范围为 $220 \sim 270 \text{ r/min}$ 。

3) 防飞溅罩壳结构与参数设计。飞溅损失、漏梳损失、回带损失和落粒损失是梳脱式割台的 4 种

主要损失途径^[21-23]。其中,飞溅损失产生的原因主要有2个:一是油菜植株生长特性不同导致的果荚受力紊乱,造成果荚被梳脱下来的瞬间朝不同的方向飞溅;二是梳脱下来的油菜在向后抛送的过程中,由于果荚和籽粒质量较小,易受到自然风的影响改变抛送路径。因此,需要设计防飞溅罩壳将割台包裹起来,使梳脱滚筒处在一个半封闭的状态下作业,可以有效地减少飞溅损失。设梳脱滚筒距离罩壳后挡板的距离为 s ,挡板高度 h_p ;梳脱滚筒的最大半径为 r_1 ,梳脱滚筒离地高度为 h_1 ,上罩壳的长度为 m ,如图8所示。

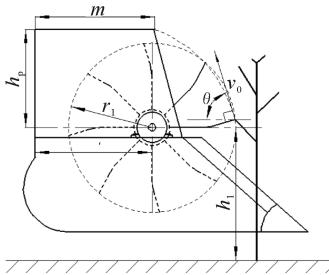


图8 物料抛送示意图

Fig.8 Schematic diagram of throwing

取梳脱弹指朝向正前方时梳脱下来的果荚作为研究对象,视为质点。由于抛送距离较短,忽略空气阻力和抛送过程中物料的相互作用力。物料运动方程为

$$\begin{cases} x = v_0 t \cos\theta \\ y = v_0 t \sin\theta - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (18)$$

式中, θ 为初速度与水平方向的夹角,其值与梳脱弹指的弯折角度有关。设梳脱弹指的弯折角度为 β ,由几何关系可知

$$\theta = \beta - 90^\circ \quad (19)$$

使罩壳能挡住该质点,需 $s + r_1 - m < x, h_p > y$,代入方程(18),得到

$$\begin{cases} s + r_1 - m < v_0 t \cos\theta \\ h_p > v_0 t \sin\theta - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (20)$$

式(20)给出了在梳脱滚筒参数确定的情况下,防飞溅挡板高度和罩壳顶盖长度的取值范围和相互关系。由该式可知,罩壳后挡板高度越大、后挡板距离梳脱滚筒的距离越远、上罩壳越长,防止飞溅损失的效果越好。但罩壳的高度过高会遮挡驾驶员的视线,影响工作;罩壳后挡板距离梳脱滚筒过远、上罩壳过长会导致割台的纵向尺寸过长,影响整机的质量分配和田间通过性,因此,罩壳尺寸选取应适中。

由于梳脱滚筒高速旋转,在半封闭的割台内会产生强大的气流场,造成已经进入割台的物料在气流的作用下飞出割台,即回带损失。因此,在罩壳壁上设计网式出风口,减少气流场对物料的影响,从而减少气流造成的损失。

4)关键部件的参数匹配设计。梳脱滚筒、拨禾轮、割台前支撑端和横割刀是梳脱式割台的关键工作部件,是实现梳脱作业的关键因素,四者能否良好配合,直接决定了梳脱作业的效果。如图9所示,在侧视图上以横割刀在地面上的投影作为原点建立直角坐标系。

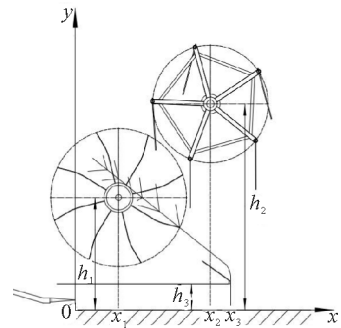


图9 割台关键部件配合示意图

Fig.9 Schematic diagram of the cooperation of key parts

设梳脱滚筒中心、拨禾轮中心和割台前支撑端的水平坐标分别是 x_1, x_2, x_3 ,高度分别为 h_1, h_2, h_3 。设梳脱滚筒的最大半径为 r_1 ,拨禾轮的半径为 r_2 。设油菜的平均株高为 L ,底荚高度为 h_d 。为使梳脱彻底,割台的工作空间需完全容纳油菜的角果层。根据几何关系可以得出

$$\begin{cases} h_3 + \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (h_1 - h_3)^2} - r_1 \leq h_d \\ \sqrt{(r_1 + r_2)^2 - (h_2 - h_1)^2} \leq x_2 - x_1 \end{cases} \quad (21)$$

拨禾轮中心离地高度须大于待收获作物平均株高^[24],即 $h_2 > L$ 。由式(5)知,拨禾轮半径越大,梳脱效果越好,但拨禾轮尺寸过大会导致整机尺寸增大,影响整机的重心位置和田间通过性,结合底盘参数,拨禾轮半径取 $r_2 = 310 \text{ mm}$ 。为实现彻底梳脱,梳脱弹指的有效伸出长度应大于油菜角果层的最大半径,取拨指的有效伸出长度为 280 mm ;为方便调节梳脱弹指的排列方式,拨指和拨指支撑架采用可拆卸设计,为方便安装,梳脱滚筒筒体的半径取 75 mm ,因此,梳脱滚筒的半径为 $r_1 = 280 + 75 = 355 \text{ mm}$ 。

在抽离过程中,当油菜的角果层完全离开梳脱滚筒的梳刷范围后才允许被割断,割断过早会导致

失去土壤拉力的油菜茎秆缠绕在梳脱滚筒上。设油菜从进入割台内部开始被梳刷到被抽离至刚刚脱离梳脱滚筒所用时间为 t_s ，机组前进速度为 v_m ，根据几何关系，可以得到

$$(v_m t_s)^2 + h_3^2 \geq [(L - h_d) + h_3]^2 \quad (22)$$

若在油菜刚好被抽离梳脱滚筒的梳刷范围时被割断，即 $x_3 = v_m t_s$ ，代入式(22)，可以得到

$$x_3^2 + h_3^2 \geq [(L - h_d) + h_3]^2 \quad (23)$$

为保证油菜角果层完全进入割台内部，割台前支撑端离地高度 h_3 应小于油菜底荚高度 h_d ，即 $h_3 \leq 525$ mm；但 h_3 过小会导致油菜进入割台的角度不一致，影响梳脱效果，同时影响田间通过性。考虑到田间会有一定程度的下陷，割台前支撑端离地高度取 $h_3 = 300$ mm。将 $L = 1\ 190$ mm、 $h_d = 525$ mm、 $h_3 = 300$ mm 代入式(23)，得 $x_3 \geq 920$ mm，为尽量减小机具尺寸，取 $x_3 = 920$ mm。当梳脱弹指恰好梳脱油菜底荚时，梳脱弹指顶端的轨迹方程为

$$\begin{cases} x_s = v_m t + r_1 \cos \omega_s t \\ y_s = h_1 + r_1 \sin \omega_s t \end{cases} \quad (24)$$

式中， x_s 、 y_s 为梳脱弹指顶端水平和垂直方向的坐标； ω_s 为梳脱滚筒角速度，rad/s。此时 y_s 等于油菜的底荚高度 h_d ，即

$$h_1 = h_d - r_1 \sin \omega_s t \quad (25)$$

根据三角函数 $-1 \leq \sin \omega_s t \leq 1$ ，代入 $h_d = 525$ mm、 $r_1 = 355$ mm，得到 h_1 的取值范围为 170 mm \leq

$h_1 \leq 880$ mm。同时，为了避免梳脱滚筒和割台底发生干涉，须满足

$$h_1 \geq h_3 + r_1 \quad (26)$$

代入数据得 $h_1 \geq 655$ mm。因此，梳脱滚筒中心离地高度的取值范围为 655 mm $\leq h_1 \leq 880$ mm。将 $h_d = 525$ mm、 $r_1 = 355$ mm、 $r_2 = 310$ mm、 $h_1 = 750$ mm、 $h_2 = 1\ 300$ mm、 $x_3 = 920$ mm 代入式(21)，得到 x_1 和 x_2 的取值范围为

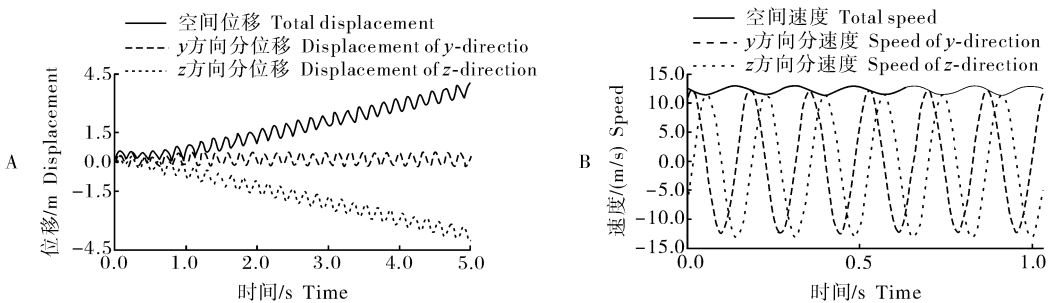
$$\begin{cases} 554 \leq x_1 \leq 1258 \\ x_2 - x_1 \geq 374 \end{cases} \quad (27)$$

即拨禾轮轴心与梳脱滚动轴心的水平距离应大于 374 mm。

2 结果与分析

2.1 仿真分析

利用 ADAMS 进行图形建模，梳脱滚筒沿圆周方向均布有 8 排梳脱弹指。每根梳脱弹指的运动状况一致，因此，取 1 根梳脱弹指进行运动学仿真分析。添加模型运动副，包括梳脱弹指和滚筒之间的固定副 1 个；梳脱滚筒和滚筒轴之间的转动副 1 个；滚筒轴和地面之间的移动副 1 个。按照梳脱滚筒的工作原理添加驱动，包括加在梳脱滚筒和滚筒轴之间的旋转驱动，模拟梳脱滚筒的圆周运动，转速 $n = 260$ r/min；加在滚筒轴和地面之间的平移驱动，模拟机组的前进运动。仿真结果如图 10 所示。



A: 梳脱弹指位移曲线 Displacement curve of a stripping finger; B: 梳脱弹指速度曲线 Velocity curve of a stripping finger.

图 10 仿真结果

Fig.10 The result of simulation

由图 10A 可以看出，梳脱弹指的空间位移曲线呈波动上升趋势，该曲线有多个时间点到达同一位移值，即可以对同一株油菜进行多次梳刷。仿真与理论设计相吻合。取任一位移值做水平直线，该直线与空间位移曲线的交点个数即为该拨指对该位置的梳刷次数。由图 10B 可以看出，梳脱弹指在 y 方向和 z 方向上的分速度曲线振幅和频率相同，二者的初始相位角偏差 90° 。弹指在 z 方向（即前进方

向）上的分速度曲线与梳脱滚筒的速比 λ 有关，该曲线与横轴有交点，说明速比 $\lambda > 1$ ，可以实现梳脱、抛送。如果该曲线与横轴相切，则 $\lambda = 1$ ；如果该曲线完全位于横轴上方，则 $\lambda < 1$ ， $\lambda \leq 1$ 时不能实现梳脱。

2.2 田间试验

2015 年 5 月 8 日至 5 月 17 日在武汉市汉南区黄鹤拖拉机制造有限公司试验田进行试验。试验油菜品种为华油杂 62，播种方式为机械直播，试验田

面积 1 200 m²，油菜田间密度 36 株/m²，平均株高 1 190 mm，平均底荚高度 525 mm，角果层周向分布最大直径 450 mm。试验后留茬高度为 260 mm。梳净率测定采用人工记数果荚的方式统计。梳净率计算公式为

$$S = \frac{n_1}{n_2} \times 100\% \quad (28)$$

表 1 试验因素及水平

Table 1 Experimental factors and levels

水平编码 Level encoding	因素 Factors		
	x_1 梳脱滚筒转速/(r/min) Rotational speed of stripping drum	x_2 梳脱滚筒离地高度/mm Height above ground of stripping drum	x_3 前进速度/(m/s) Forward velocity
1	260	750	0.7
2	340	850	0.4

表 2 正交试验及结果

Table 2 Orthogonal experiments and analysis of their results

试验号 Test number	试验因素 Test factors			梳净率/% Removal rate
	x_1	x_2	x_3	
1	1	1	1	81.2
2	1	2	2	83.7
3	2	1	2	88.3
4	2	2	1	86.4
极差 Range	4.9	0.3	2.2	/

由极差值可以看出，梳脱滚筒转速对梳净率的影响最大，机具前进速度对梳净率的影响次之。梳脱滚筒转速越高，梳净率越高。但是，过高的滚筒转速会导致功耗上升和损失率增加，过低的前进速度会降低工作效率。试验情况如图 11 所示。试验结果表明，梳脱式割台能梳脱油菜的果荚和分枝；梳脱弹指的梳刷效果、抛送效果可以满足要求；拨禾轮的拨倒效果良好，可以满足梳脱作业的需要；切割装置可以将梳净的油菜主茎秆割倒，铺放在田间；各工作部件的配合良好。



图 11 田间试验

Fig.11 The field test

3 讨论

本研究探索性地将梳脱式收获方式应用于油菜联合收获机中，设计了可以实现拨禾、梳脱、抛送、切割、收集和输送功能的油菜联合收获机梳脱式割台，

式(28)中， S 为样机梳净率； n_1 为收集到的果荚数量，个； n_2 为试验区域内果荚总数，个。其中，若果荚破裂，以 2 个颖壳记作 1 个果荚。以梳脱滚筒转速、梳脱滚筒离地高度、机组前进速度为因素进行三因素两水平正交试验。试验因素与水平设计如表 1 所示。正交试验结果如表 2 所示。

能够满足联合收获的基本要求。根据油菜的物料特性和田间分布规律确定了梳脱元件的形式、数量和交错排列的安装方式，实现了梳脱元件地面投影对油菜的全覆盖；明确了梳脱滚筒转速、机组前进速度与油菜植株参数的关系。明确了梳脱式割台的拨禾轮、梳脱滚筒、切割装置和防飞溅罩壳的结构参数、运动参数，明确了合理的参数组合。梳脱式割台的拨禾轮具有辅助梳脱的作用，与传统割台的拨禾轮相比，对推送功能要求较低，而对扶持功能要求更高。为了保证梳脱式割台的梳脱效果，依据梳脱式工作原理，梳脱滚筒梳脱油菜的过程中，拨禾轮应使油菜角果层在一定时间内完全处于割台内部。梳脱滚筒是梳脱式割台的核心部件，不仅影响梳脱的梳净率和损失率，且对整机的工作效率、清选质量都有很大的影响。常见的梳脱元件有板齿式、弓齿式、弹指式等。根据油菜主茎秆直径差异较大、分枝多的植株特性，选用倾斜的弹指式梳脱元件。飞溅损失是梳脱式割台的主要损失途径之一，其产生的原因主要有 2 个：一是油菜植株生长特性不同导致的果荚受力紊乱，造成果荚被梳脱下来的瞬间朝不同的方向飞溅；二是梳脱下来的油菜在向后抛送的过程中，由于果荚和籽粒质量较小，易受到自然风的影响改变抛送路径。因此，设计防飞溅罩壳将割台包裹起来，使梳脱滚筒处在一个半封闭的状态下作业，可以有效地减少飞溅损失。梳脱滚筒、拨禾轮、割台前支撑端和横割刀是梳脱式割台的关键工作部件，是实现梳脱作业的关键因素，四者能否良好配合，直接决定了梳脱作业的效果。田间试验表明，梳脱式割台可以在避免油菜主茎秆进入割台的情况下，只捋取油菜的果荚和分枝，实现梳脱收获。在后续的研究中，应进一步优化罩壳形状，从而更好地利用罩壳

内气流场对梳脱、抛送的辅助作用;同时,探讨梳脱式割台与复脱装置、旋风清选装置的匹配关系,进一步提高效率、降低损失率。

参 考 文 献

- [1] 徐立章,李耀明,马朝兴,等.4LYB1-2.0型油菜联合收获机主要部件的设计[J].农业机械学报,2008,39(8):54-57.
- [2] 李海同,黄鹏,舒彩霞.我国稻麦油机械化收获技术研究现状与趋势[J].农业工程,2013,3(5):1-6.
- [3] 董月亮,李耀明,徐立章.油菜联合收割机割台损失影响因素的试验研究[J].农机化研究,2008(5):109-112.
- [4] 罗海峰,汤楚宙,官春云,等.油菜机收割台茎秆分离装置设计与试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(5):548-550.
- [5] 兰心敏,李民.油菜联合收获机割台损失率测定方法的研究[J].中国农机化学报,2011,32(4):70-74.
- [6] 吴崇友,肖圣元,金梅.油菜联合收获与分段收获效果比较[J].农业工程学报,2014,30(17):10-16.
- [7] 金诚谦,吴崇友.油菜收获技术基础研究现状与展望[J].农机化研究,2010,32(1):5-9.
- [8] 李海同,廖庆喜,李平,等.油菜联合收获机分体组合式割台的设计[J].华中农业大学学报,2014,33(5):111-116.
- [9] 袁建宁,李显旺.梳脱式收获机设计理论的研究[J].农业机械学报,1998,29(2):37-43.
- [10] 张利娟,耿令新,师清翔,等.双螺旋喂入割前脱粒微型水稻联合收割机的设计[J].农机化研究,2014,36(10):84-87.
- [11] 石磊,李显旺,张彬,等.梳脱式联合收割机的试验研究[J].农机化研究,2011,33(1):186-189.
- [12] 王林,郭超,付君.稻麦割前脱粒技术的研究[J].农业装备与车辆工程,2011(9):1-2.
- [13] 雷明举,孔令军,陈永成,等.弹齿滚筒式辣椒采摘装置的研究设计[J].中国农机化学报,2014,35(1):161-165.
- [14] 秦新燕,陈永成,张福庆,等.4LZ-3.0型自走式辣椒收获机的设计研究[J].农机化研究,2012,34(8):53-56.
- [15] 王立军.割前摘脱稻麦联合收获机分离清选装置物料运动模拟[J].农业机械学报,2011(S1):62-64.
- [16] 韩豹,蒋亦元,吴文福.倒伏超级稻割前摘脱台试验[J].农业工程学报,2011,27(6):90-94.
- [17] 胡爽吉.梳齿式辣椒采摘装置的设计研究[D].石河子:石河子大学,2012.
- [18] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [19] 祁兵,杨晓京,吕鹏翔.基于Adams的联合收割机拨禾轮前移范围的仿真研究[J].农机化研究,2011,33(3):70-72.
- [20] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [21] 张际先,张雅.摘脱式联合收割机割台损失的研究[J].江苏理工大学学报(自然科学版),2000,21(6):26-30.
- [22] 林国展.降低梳穗台损失的措施分析[J].农业机械学报,2004,35(4):62-65.
- [23] 徐立章,李耀明,马朝兴.梳脱式联合收割机新型割台的研究设计[J].农机化研究,2002(3):75-77.
- [24] 李平.4SY-1.8型油菜割晒机关键部件工作机理与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2014.

Designing rapeseed harvester combined stripping table with cutting table

JI Muye¹ LIAO Qingxi^{1,2} LI Haitong¹ WAN Xingyu¹ WANG Hua¹ ZHAO Yingbiao¹

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Collaborative Innovation Center of Paddy Crop and Oil Crops in Southern, Changsha 410128, China

Abstract A rapeseed harvester combined stripping table with cutting table was designed based on the biological characteristics of rapeseed. By modeling the kinematic buildings of stripping drum and reel slat, the parameters of structure and kinematic parameters of reel slat, stripping drum, cutting unit and cover casing were determined. Parameter combinations were optimized and motion simulation analyses of stripping drum were made. The results showed that the ground projection of stripping fingers covered the whole crops when the distance of fingers was 70 mm and their axial obliquity was less than 82°. The rotation rates of reel slat and stripping drum were 20-30 r/min and 220-270 r/min, respectively. The horizontal distance of them should be wider than 374 mm. The results of simulation and field trials showed that stripping cutting table realized stripping, throwing, cutting and reeling straw. It will provide a new method of designing the structure of rapeseed oil combined harvester.

Keywords agricultural machinery; rapeseed; rape harvester; combine harvest; combined stripping table with cutting table; structure design

(责任编辑:陆文昌)