doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.012

工业大麻收获机割台设计与试验

郝朝会[1,2]　吴宗剑[3]　李元宝[1]　魏道初[3]　周建平[1]　李素贤[4]

（1. 新疆大学现代产业与智能制造学院，乌鲁木齐 830017；2. 中农机（北京）科技发展有限公司，北京 102206；
3. 新疆农业大学机电工程学院，乌鲁木齐 830052；4. 新疆工程学院机电工程学院，乌鲁木齐 830023）

摘要：针对工业大麻机械化收获过程中割台作业性能和割铺质量差、效率低、故障率高、成本高、割台易堵塞和割刀装置易损坏等问题，对扶禾装置进行理论分析，得到了麻秆不被推倒或折断和多株拨送条件下理想状态甩麻转速为107.17~283.09 r/min；对割刀装置进行了运动学和动力学分析，并设计了配重块平衡曲柄惯性力，配重块质量6.672 kg；基于响应曲面分析法进行田间试验，得到最佳参数组合：甩麻转速为628.08 r/min、行车速度为7.28 km/h、割刀转速为502.73 r/min，此时麻秆铺放角、角度差和根差分别为89.02°、5.16°和17.46 mm；基于最优参数组合，试验测定割台麻秆铺放角为88.20°，角度差为4.95°，根差为18.35 mm，与理论优化值相对误差均不大于4.85%。田间试验结果表明，设计的割台各项性能参数满足标准技术要求，能够实现较好的割铺效果，可以满足工业大麻机械化收获要求。

关键词：工业大麻；割铺台；铺放角度；机械化收割

中图分类号：S225.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2024)S2-0112-10

Design and Test of Industrial Hemp Cutting Table

HAO Zhaohui[1,2]　WU Zongjian[3]　LI Yuanbao[1]　WEI Daochu[3]　ZHOU Jianping[1]　LI Suxian[4]

(1. *School of Intelligent Manufacturing and Modern Industry, Xinjiang University, Urumqi* 830017, *China*
2. *China Agricultural Machinery (Beijing) Technology Development Co., Ltd., Beijing* 102206, *China*
3. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*
4. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi* 830023, *China*)

Abstract: Aiming at the industrial hemp mechanized harvesting process, the cutting table operating performance and cutting and laying quality is poor, low efficiency, high failure rate, and high cost, the cutting table is easy to be blocked and the cutter device is easy to be damaged, etc., the theoretical analysis of the harvesting device was carried out, and the ideal hemp dumping rotational speed under the conditions of the hemp stalks were not pushed down or broken and multiple plants were dialed for 107.17~283.09 r/min was obtained. Kinematics and dynamics analysis of the cutter device was done, and a counterweight block was designed to balance the inertia force of the crank, the mass of the counterweight block was 6.672 kg; based on the response surface analysis method for field tests, the best combination of parameters were as follows: flinging speed was 628.08 r/min, traveling speed was 7.28 km/h, the cutter speed was 502.73 r/min; at this time, the stalks laying angle, the angle difference and the root difference were respectively 89.02°, 5.16° and 17.46 mm; based on the optimal parameter combination, the straw laying angle of the cutting table was 88.20°, the angle difference was 4.95°, and the root difference was 18.35 mm, and the relative errors with the theoretical optimized values were no more than 4.85%. Field test results showed that the designed cutting table performance parameters met the standard technical requirements, which can achieve better cutting and spreading effects, and can meet the industrial hemp mechanized harvesting requirements.

Key words: industrial hemp; cutting platform; laying angle; mechanized harvesting

收稿日期：2024-07-28　修回日期：2024-09-18

基金项目：新疆自治区博士后项目(10062300211)、新疆自治区重点研发专项(2022B02023-2)和大学生创新创业训练计划项目(202310994002、S202310994018)

作者简介：郝朝会(1984—)，男，博士后，中农机(北京)科技发展有限公司正高级工程师，主要从事智能农机装备研究，E-mail: kkk-875@163.com

通信作者：周建平(1974—)，男，教授，博士生导师，主要从事特种加工、机电一体化和智慧农业研究，E-mail: linkzhou@163.com

0　引言

工业大麻种植面积逐年扩大，2022年我国工业大麻种植面积约为2.65×10^4 hm^2，产量约为1.45×10^5 t。

国外工业大麻机械化水平比国内技术相对领先[1]，波兰天然纤维与药用植物研究所和德国特殊用途机械制造商Kranemann GmbH联合研发了一款工业大麻割晒机；美国约翰迪尔利用玉米收获机改进后设计出工业大麻割晒机；捷克Tebeco企业研制了一款Tebeco Clipper 4.3 MMH型工业大麻割晒机；俄罗斯有一款大麻专用籽粒联合收获机械，KKP-1.8型半悬挂式大麻联合收获机。荷兰的天然纤维加工企业Dun Agro公司与Wittrock公司联合研制开发的大麻收获机，主要应用于纤维和饲料两用工业大麻的收获[2-5]。国外工业大麻收获机械多为联合收获作业，大麻割晒机研发较少，且种植农艺和加工工艺和国内略有不同，未见有适合我国农艺要求的大麻割铺机械。

近年来我国工业大麻产业快速发展，通过结合亚麻、苎麻和芦苇等高秆作物的收割技术，设计了4GS-2880型汉麻割晒机，主要适用于汉麻、大麻、亚麻和芦苇等作物大面积割晒作业[2-6]。目前国内工业大麻收获机械化水平低，主要依靠人工作业和拖拉机改制的背负式大麻割铺机，以及小工厂改制的自走式大麻割铺机为主，作业性能和割铺存在质量差、效率低、故障率高、成本高、割台易堵塞和割刀装置易损坏等问题，作业性能和作业效果无法满足我国大麻工业化生产需求。

结合我国工业大麻种植模式和农艺要求[6-10]，本文对大麻割台进行设计与试验，以期解决工业大麻机械化收割作业中存在的故障和效率等问题，以提高我国工业大麻机械化水平。

1　工业大麻植株特性与机械化种植农艺

1.1　植株特性

工业大麻为深耕植物，根系发达。工业大麻株高为1.5~5 m，茎粗为6~45 mm，直立茎，颈部多有分枝[11]。工业大麻颈部最外层为表层，从外向内依次为皮层、次生皮层、韧皮部、形成层、木质部和髓，纤维层占麻茎质量25%~40%，木质部占55%~60%，工业大麻纤维束大多位于次生皮层[12-13]。大麻纤维呈白色或黄色，有光泽，质地强，柔软度不如亚麻和苎麻。工业大麻茎部高度与直径比值对纤维含量影响十分明显，茎部越长越细，纤维含量越高，最佳工业大麻高度为2~2.5 m，直径为6~10 mm。工业大麻茎秆截面如图1所示。

1.2　机械化种植农艺

纤用工业大麻，通过收割机整秆收割工业大麻植株茎秆，采用剥麻机剥制获得工业大麻纤维。工业大麻生产流程大致为：播种→收获→翻麻→捆麻→切秆→剥制→打包；种植、收获过程以及后续的剥麻过程基本实现机械化，但部分生产环节仍由人工完成[3,7,11]。



图1　工业大麻茎秆截面图

Fig. 1　Cross-sectional view of industrial hemp stem

1. 表层　2. 皮层　3. 次生皮层　4. 韧皮部　5. 形成层　6. 木质部　7. 髓

工业大麻收获过程大致为：机械收割放铺→人工翻麻→人工捆麻→运至加工场地。收割工业大麻茎秆后平铺于地面，雨露沤麻后捡拾打捆输送至加工厂，采用干茎打麻机加工获取工业大麻纤维，经集中脱胶处理，用作纺织原料[5,12-16]。

2　割台结构与工作原理

工业大麻割台的性能决定着收获质量以及后续深加工等，对工业大麻割台进行理论分析和设计能够保障工业大麻收获质量和效率提升[17-21]。

2.1　割台结构

工业大麻割台包括：分禾装置、扶禾装置、切割装置、拨禾输送铺放装置和机架等。大麻割台和整机通过割台悬挂装置连接。大麻割台结构示意图如图2所示。

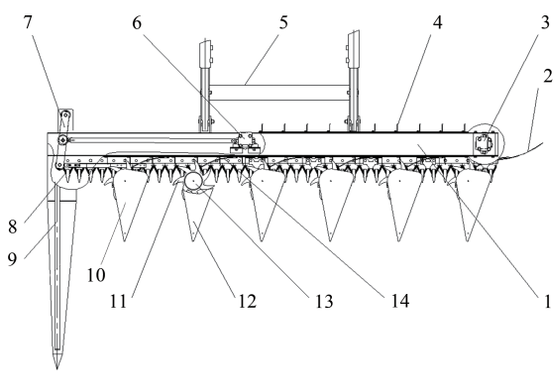


图2　工业大麻割铺台结构示意图

Fig. 2　Schematic of structure of industrial hemp cutting table

1. 机架　2. 铺放器　3. 拨禾输送铺放装置　4. 拨禾输送带　5. 割台悬挂装置　6. 驱动装置　7. 切割装置　8. 切割器　9. 扶禾装置　10. 分禾装置　11. 拨禾星轮　12. 分禾板　13. 防缠草盖　14. 分禾弹齿

大麻割台挂接在割台悬挂装置前部，分禾装置位于机架前部并与机架连接，包括拨禾星轮、分禾板、防缠草盖等，拨禾星轮在拨禾输送带作用下转动，并在分禾板配合下实现分禾与输送交接；扶禾装置位于大麻割台一侧，包括分禾器、扶禾链条、驱动装置、机架等，用于分禾与扶起倒伏的大麻植株；切割装置位于分禾装置下方，并与机架连接，包括切割器、驱动装置，用于切割大麻植株；拨禾输送铺放装置安装在机架上，包括拨禾输送带与铺放器，用于切割后的大麻植株横向输送与铺放。工

作液压系统包括扶禾装置、切割装置、拨禾输送铺放装置3个液压驱动子系统和大麻割台前后摆动与升降2个液压执行机构[21]。

大麻割台挂接在割台悬挂装置前部，扶禾装置、切割装置、拨禾输送铺放装置均采用液压驱动，可以分别调整其转速。割台悬挂装置挂接在行走系统前部，为1个4连杆机构，4连杆机构中1组为控制大麻割台前后摆动的油缸（左右2个），另1组（左右2个）液压油缸用于调节大麻割台离地高度，收获时受到风向与坡地影响，造成铺放质量不高，堵塞严重，生产效率低。

2.2 工作原理

割台悬挂装置分别由割台前后摆动油缸与割台升降油缸控制大麻割台倾角与离地间隙；液压系统采用电磁阀分别控制扶禾装置、切割装置、拨禾输送铺放装置转速，提高收获适应性；采用电磁阀分别控制割台油缸、前后摆动油缸、升降油缸等，扶禾、切割、拨禾、输送等转速能够独立调整，结构简单，作业效率高，割茬低，收获铺放质量好，能同时完成分禾、扶禾、切割、拨禾输送与铺放等作业，有效提高了收获质量。

3 关键装置设计

3.1 分禾器结构参数设计

工业大麻机械化收获中，分禾器直接影响收获效率和大麻植株处理质量。根据大麻植株形态和生长特点，为确保在收获过程中能稳定地将植株扶起、分禾，使其顺利进入后续的收割环节，参考其他类似农作物机械收获割台特点，工业大麻分禾器采用星轮分禾器。分禾星轮圆周方向上均布7个扶禾指，主要用于分禾和扶禾输送。拨指将麻秆拨送至扶禾器的过程中转速应满足麻秆不被推倒或折断，同时能够实现顺行收获时拨指拨送多株大麻，形成多株连续有序喂入[22]。

3.1.1 麻秆不被推倒或折断条件

麻秆在进麻处与扶禾星轮接触，扶禾星轮上的螺旋导向叶片将麻秆迅速向后输送，倾斜的麻秆开始向后回弹，此时麻秆与地面夹角大于等于其与地面的极限夹角，不会被推倒折断。

如图3所示，机器前进时，麻秆从分禾器尖D滑动到分禾器尾端E，假定只有横向偏移；扶禾星轮拨指从点E旋转至点F时，经测量旋转角为51.43°，在前进方向大麻偏移量为S，大麻与地面夹角为β，则大麻不被推倒或折断条件表示为

$$\beta \geqslant \gamma \tag{1}$$

其中

$$\beta = \arctan\frac{H}{\sqrt{L^2 + S^2}} \tag{2}$$

$$S = vt \tag{3}$$

$$a = 6N_b t \tag{4}$$

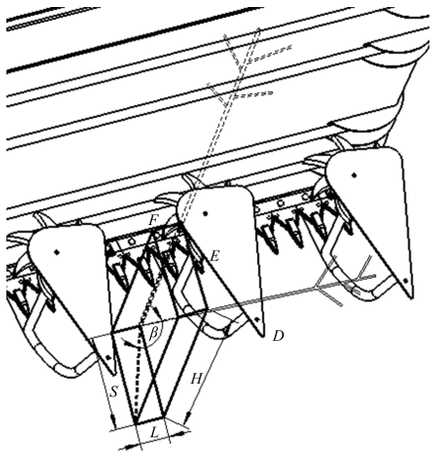


图3 麻秆偏移示意图

Fig. 3 Schematic of hemp stalk offset

可得

$$S = \frac{av}{6N_b}$$

代入式(1)可得

$$N_b \geqslant \frac{av\tan\gamma}{6\sqrt{H^2 - (L\tan\gamma)^2}} \tag{5}$$

式中 N_b——扶禾星轮转速，r/min

a——扶禾星轮转过角，(°)

t——扶禾星轮旋转时间，s

v——机器前进速度，取1.94 m/s

H——扶禾星轮离地高度，取0.45 m

L——麻秆最大横向偏移量，取0.3 m

γ——麻秆不被推倒折断时与地面的极限夹角

根据现场作业经验，经计算夹角为45°~55°，γ取50°，则$N_b \geqslant 72.53$ r/min。

3.1.2 分禾星轮拨指多株拨送条件

顺行收获时，两相邻分禾器间只有1行大麻，若扶禾星轮拨指每旋转一周只拨送1行大麻，则能够形成多株连续喂入。

如图4所示，第1行大麻在a处，经扶禾轮拨指1抓取、横向输送至摘穗口，机器前进S_{ab}，忽略分禾器对大麻在前进方向产生的偏移，第2行大麻从b处滑移至a处，若此时拨指2已提前或刚好到达a处，则可实现每个拨指每旋转1周只拨送1行大麻，则时间可表示为

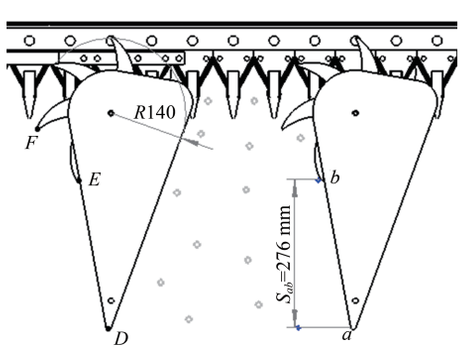


图4 麻秆喂入示意图

Fig. 4 Schematic of hemp straw feeding

$$\frac{S_{ab}}{v} \geqslant \frac{\frac{2\pi}{7}}{\frac{2\pi N_b}{60}} \tag{6}$$

即 $$N_b \geqslant \frac{60v}{7S_{ab}} \tag{7}$$

式中　S_{ab}———大麻行距，取0.276 m

计算得$N_b \geqslant 60.25$ r/ min。

3.1.3　植株输送过程中进麻总数及不堵麻条件

经实地试验测量得大麻地种植密度ρ为127株/m^2，则总进麻量为

$$w_1 = 5w \tag{8}$$

其中 $$L_1 = vt_1 \tag{9}$$

$$w = \rho L_1 L_2 \tag{10}$$

式中　t_1——单位时间，取1 s

L_1——单位时间内大麻收割机前进距离，m

L_2——两分禾装置之间距离，取0.46 m

w——两分禾装置之间进麻量，株

w_1——总进麻量，株

已知割刀长度为2 800 mm，单位时间内两分禾装置之间进麻量约113株，总进麻量约567株。

在确保传送带不空载情况下，单位时间内传送带速度可表示为

$$v_1 \leqslant \frac{s}{t_1} \tag{11}$$

式中　s——割刀总长度，取2.8 m

计算得$v_1 \leqslant 2.8$ m/s。

单位时间内所割麻秆被传送带导向到最后两分禾装置之间进行挤压被顺利甩出，如图5所示，传送带速度可表示为

$$v_2 \geqslant \frac{s}{t_2} \tag{12}$$

其中 $$t_2 = 5\,t_1$$

式中　t_2——从传送带一端到另一端的总时间

计算得$v_2 \geqslant 0.56$ m/s。

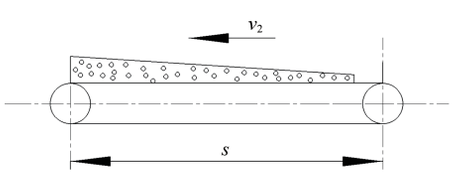


图5　麻秆输送示意图

Fig. 5　Schematic of hemp straw transportation

在大麻收获机正常运行时，理论情况下可得扶禾星轮转速为

$$N_{b1} = \frac{v_1}{2\pi r} \tag{13}$$

$$N_{b2} = \frac{v_2}{2\pi r} \tag{14}$$

式中　r——扶禾星轮半径，取0.14 m

计算得$N_{b1} \leqslant 191.08$ r/ min，$N_{b2} \geqslant 38.22$ r/ min。

则满足植株输送过程中进麻总数及不堵麻条件扶禾星轮转速为38.22~191.08 r/min。

综上，满足麻秆不被推倒或折断的条件，同时能够实现顺行收获时拨指拨送多株大麻，形成多株连续有序喂入，且在植株输送过程中进麻总数及不堵麻条件下的扶禾星轮转速为72.53~191.08 r/min。

正常工作条件下，扶禾星轮转速已知时，对甩麻转速计算式为

$$n = \frac{v_3}{2\pi r_1} \tag{15}$$

其中 $$v_3 = 2\pi r\, N_b \tag{16}$$

式中　r_1——传动带轮半径，取0.0945 m

v_3——甩麻速度，取1.06~2.8 m/s

计算得n为107.17~283.09 r/ min。

综上，正常工作条件下理想状态甩麻转速为107.17~283.09 r/ min。考虑采收时植株状态和甩麻风阻等因素，实际甩麻速度应高于理想甩麻速度。

3.2　切割装置结构参数设计

切割装置是收割机重要工作部件。根据工业大麻植株特性，选定往复式切割器，其具有结构简单、切削速度小、工作质量好、使用可靠、不会漏割和易配套等特点，能够满足工业大麻机械化收割要求[23-29]。

工业大麻割铺机中的往复式切割器工作原理为将曲柄连杆机构中曲柄的圆周运动转换为刀杆往复运动，切割夹在动刀片和定刀片之间的工业大麻，其驱动机构运动简图如图6所示。为方便计算，简化图如图7所示。

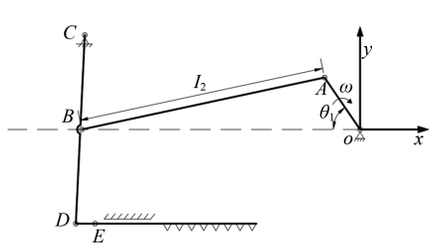


图6　割刀装置运动简图

Fig. 6　Motion diagram of cutting blade device

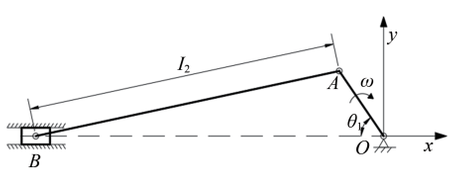


图7　割刀装置闭环矢量图

Fig. 7　Closed loop vector diagram

3.2.1　运动学分析

由图7可得矢量方程为

$$\boldsymbol{l}_{OA}=\boldsymbol{l}_{BA}+\boldsymbol{l}_{OB}$$

得点A坐标为

$$\begin{cases} x_A = l_1\cos\theta_1 = l_1\cos(\omega t_3) \\ y_A = l_1\sin\theta_1 = l_1\sin(\omega t_3) \end{cases} \tag{17}$$

得点B坐标为

$$\begin{cases} x_B = x_A + l_2\cos\theta_2 \\ \quad = l_1\cos(\omega t_3) + l_2\cos\theta_2 \\ y_B = y_A + l_2\sin\theta_2 \\ \quad = l_1\sin(\omega t_3) + l_2\sin\theta_2 = 0 \end{cases} \tag{18}$$

式中 l_1——曲柄长度,取0.02 m

l_2——连杆长度,取1.2 m

ω——曲柄角速度

可得点A速度为

$$\begin{cases} \dot{x}_A = -\dot{\theta}_1 l_1\sin\theta_1 = -\omega l_1\sin(\omega t_3) \\ \dot{y}_A = \dot{\theta}_1 l_1\cos\theta_1 = \omega l_1\cos(\omega t_3) \end{cases} \tag{19}$$

点A加速度为

$$\begin{cases} \ddot{x}_A = -\dot{\theta}_1{}^2 l_1\cos\theta_1 = -\omega^2 l_1\cos\theta_1 \\ \ddot{y}_A = -\dot{\theta}_1{}^2 l_1\sin\theta_1 = -\omega^2 l_1\sin\theta_1 \end{cases} \tag{20}$$

点B速度为

$$\begin{cases} \dot{x}_B = -\dot{\theta}_1 l_1\sin\theta_1 - \dot{\theta}_2 l_2\sin\theta_2 \\ \quad = -\omega l_1\sin(\omega t_3) - \dot{\theta}_2 l_2\sin\theta_2 \\ \dot{y}_B = \dot{\theta}_1 l_1\cos\theta_1 + \dot{\theta}_2 l_2\cos\theta_2 \\ \quad = \omega l_1\cos(\omega t_3) + \theta_2' l_2\cos\theta_2 = 0 \end{cases} \tag{21}$$

点B加速度为

$$\begin{cases} \ddot{x}_B = -\dot{\theta}^2 l_1\cos\theta_1 - l_2\left(\ddot{\theta}_2\sin\theta_2 + \dot{\theta}_2^2\cos\theta_2\right) \\ \quad = -\omega^2 l_1\cos\theta_1 - l_2\left(\ddot{\theta}_2\sin\theta_2 + \dot{\theta}_2^2\cos\theta_2\right) \\ \ddot{y}_B = 0 \end{cases} \tag{22}$$

通过分析运动特性得到割刀位移与速度关系为

$$\begin{cases} x = -l_1\cos(\omega t_3) \\ v_x = l_1\omega\sin(\omega t_3) = \omega\sqrt{l_1{}^2 - x^2} \\ a_x = l_1\omega^2\cos(\omega t_3) \end{cases} \tag{23}$$

$$H = -l_1\cos 180^\circ + l_1\cos 0^\circ = 2l_1 = 40\text{ mm} \tag{24}$$

动刀片运动速度v_x和位移x是椭圆方程式关系,即

$$\frac{v_x^2}{l_1^2\omega^2} + \frac{x^2}{l_1^2} = 1 \tag{25}$$

当$x = \pm l_1$时,曲柄连杆运动到死点位置,割刀运动到极点位置,此时割刀速度为零,加速度最小值为$-\omega^2 l$;随着曲柄转动,割刀位移和速度逐渐加大;当$x = 0$时,曲柄连杆运动到中点位置时,割刀速度达到最大值ωl,此时加速度为0。设割刀平均速度为切割速度V_p,即

$$V_p = 10^{-3}\frac{S_1}{t_3} = \frac{nS_1}{3\times 10^{-4}} \tag{26}$$

式中 S_1——割刀切割总位移,mm

t_3——割刀在一个切割行程内所需时间,s

n——曲柄转速,r/min

3.2.2 动力学分析

由偏置曲柄滑块机构组成的往复式切割器,其曲柄和连杆作回转运动、切割器动刀与连杆作往复运动时皆会产生不平衡惯性力,从而引起机器振动。曲柄转速越快,所产生的不平衡惯性力和振动越大,会使切割器零件以及割台产生变形甚至破坏,为此需要对割刀惯性力进行平衡。在曲柄对面增设配重,利用配重离心力平衡曲柄离心惯性力以及割刀部分往复惯性力。为了简化,设连杆质量2/3随割刀作直线往复运动,1/3随曲柄作圆周运动。如图8所示。

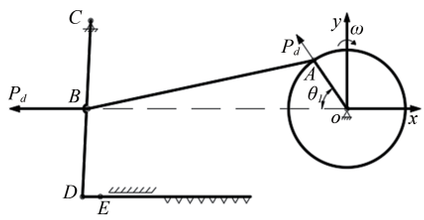


图8 割刀装置受力简图

Fig. 8 Force diagram of cutting blade device

曲柄离心惯性力为$m_c\omega^2 l_1$,$m_c = 0.70$ kg;割刀往复惯性力为$m_d\omega^2 l_1\cos\theta_1$,$m_d = 8.48$ kg;连杆惯性力为$\frac{1}{3}m_e\omega^2 l_1 + \frac{1}{3}m_e\omega^2 l_1\cos\theta_1$,$m_e = 3.29$ kg;整个机构离心惯性力为

$$P_q = \left(m_c + \frac{1}{3}m_e\right)\omega^2 l_1 \tag{27}$$

整个机构往复惯性力为

$$P_d = \left(m_c + \frac{2}{3}m_e\right)\omega^2 l_1\cos\theta_1 \tag{28}$$

在曲柄对面加一质量为m_b的平衡配重,使其产生的惯性力与P_q平衡,即

$$m_b\omega^2 l_p = \left(m_c + \frac{1}{3}m_e\right)\omega^2 l_1 \tag{29}$$

则平衡机构离心惯性力所需平衡配重为

$$m_b = \frac{l_1}{l_p}\left(m_c + \frac{1}{3}m_e\right) \tag{30}$$

取l_q为15 mm,则m_b为2.4 kg。

在曲柄对面加配重,设所加平衡配重为m_p,使其产生的离心惯性力的水平分力与往复惯性力正好平衡(图9),即

$$m_p\omega^2 l_p\cos\theta_1 = \left(m_d + \frac{2}{3}m_e\right)\omega^2 l_1\cos\theta_1 \tag{31}$$

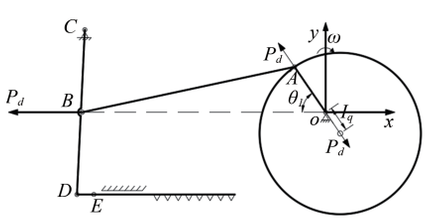


图9 割刀装置加配重块后受力简图

Fig. 9 Stress diagram after adding counterweight block

加配重平衡往复惯性力后,会增加垂直惯性力$m_p\omega^2 l_p\cos\theta_1$。

采用部分平衡往复式惯性力方法(λ为0.25~0.50,取0.3)

$$m_p\omega^2 l_p\cos\theta_1=\lambda\left(m_d+\frac{2}{3}m_e\right)\omega^2 l_1\cos\theta_1 \tag{32}$$

即 $$m_p=\frac{l_1}{l_p}\lambda\left(m_d+\frac{2}{3}m_e\right)$$

则 m_p = 4.272 kg。综上，偏心块质量为6.672 kg。

3.2.3　割刀仿真

通过ADAMS软件进行运动学仿真，可以直观地分析割台作业过程中割刀位移、速度以及加速度变化规律，以验证割刀设计合理性。

在Solidworks中对切割器进行建模，导入ADAMS，为构建的切割器模型添加约束和驱动，切割器仿真模型如图10所示。

设置仿真时间为1 s、步长为100进行仿真分析，结果如图11所示。

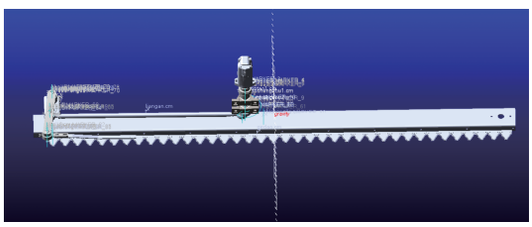


图10　往复式切割器仿真模型

Fig. 10　Simulation model of reciprocating cutter

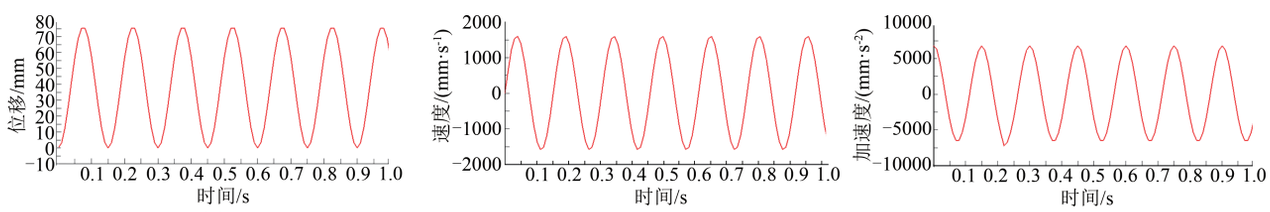


图11　割刀位移、速度和加速度随时间变化曲线

Fig. 11　Graphs of cutter displacement, velocity and acceleration versus time

由图11a可以看出，随着时间变化，割刀位移呈正弦曲线变化，正弦曲线峰谷极点值即为动刀片两个不同方向的最大位移。通过最大值和最小值差值可以看出，动刀片有效行程为75 mm。

由图11b可以看出，当曲柄匀速转动时，连杆带动割刀做往复运动，可将其速度变化近似看做正弦变化。动刀片最大速度出现在曲柄与连杆垂直处，在动刀片最大位移处或初始点时其速度为0。

由图11c可以看出，割刀加速度也可近似看做正弦曲线规律。在切割开始时动刀片加速度为最大值，切割完成时为最小值，当曲柄和连杆为垂直状态时其加速度为0。

动刀片有效行程为75 mm，其最大速度出现在曲柄与连杆垂直处，0速度出现在动刀片的最大位移或初始点处。切割开始时动刀片加速度为最大值，切割完成时为最小值，当曲柄和连杆为垂直状态时其加速度为0。该仿真结果验证了理论运动分析的正确性。

4　田间试验

4.1　试验方法

参照GB /T 8097—2008《收获机械　联合收割机试验方法》和GB/T 5262-2008《农业机械试验条件 测定方法的一般规定》进行田间试验，对割台铺放角、角度差和根差等进行试验验证。利用霍尔传感器采集机器转速等相关数据，利用角度尺、游标卡尺、一级精度卷尺、电子秤和台秤等测量工具，测量麻秆直径、质量、铺放角、根差和角度差等[23]。

设定机器在测定区内前进方向为0刻度线，测量植株与0刻度线间的夹角为铺放角，在测定区内长度方向上测定3点，测定每点1 m长度内植株铺放角，取其平均值。在测定区内长度方向上测定3点，测定每点1 m长度内植株铺放角最大值和角最小值差的绝对值，取其平均值。在测定区内长度方向上测定3点，测定每点1 m长度内的植株切口间的垂直距离最大值，取其平均值。

4.2　试验条件

于2019年8—10月在黑龙江省齐齐哈尔市肇州地区进行试验，品种为火麻5号（种麻）。挂接机器配套动力51.5 kW，发动机额定转速2 200 r/min。选定5块长20 m、宽6 m的地块，进行来回往复收割试验。试验时，环境温度和试验用液体的温度在20~37 ℃之间。试验仪器设备有：一级精度卷尺、角度尺、游标卡尺、电子秤、台秤、秒表、转速仪和霍尔传感器等[24]。

4.3　正交试验

4.3.1　试验设计

正交试验因素为：甩麻转速、行车速度、割刀转速。结合大麻生产工艺实际需求，评价指标选为铺放角 y_1、角度差 y_2 和根差 y_3。麻秆参数按试验标准进行现场试验采集，对其参数做定值处理，如表1所示。

表1　麻秆定值参数

Tab. 1　Parameters of hemp straw value

参数	行距/mm	高度/mm	直径/mm	质量/g	密度/(株·m^{-2})
数值	12	3 065	13.4	173	127

4.3.2　试验方法

利用Box-Behnken中心组合试验方法设计多因素正交试验，通过Design-Expert软件进行数据分析并建立相应的多元二次回归方程来确定各因素对铺放角、角度差和根差的影响规律。

利用正交试验设计表$L_9(3^4)$,设计3因素3水平正交试验,试验因素编码如表2所示。

表2 试验因素编码

Tab. 2 Test factor code

编码	因素		
	甩麻转速/(r·min^{-1})	行车速度/(km·h^{-1})	割刀转速/(r·min^{-1})
−1	500	6	400
0	625	8	500
1	750	10	600

4.3.3 正交试验结果

通过Box-Behnken中心组合试验设计理论,设计3因素3水平正交试验,共计17组试验,试验方案与结果见表3,A、B、C为因素编码值。

表3 正交试验安排与结果

Tab. 3 Orthogonal test arrangement and results

序号	因素			y_1/(°)	y_2/(°)	y_3/mm
	A	B	C			
1	0	0	0	88	4	13
2	1	0	1	78	26	35
3	0	0	0	82	7	15
4	0	−1	−1	91	13	46
5	0	1	1	80	40	51
6	−1	0	−1	58	15	26
7	0	0	0	86	5	16
8	−1	1	0	60	44	40
9	0	−1	1	97	15	43
10	0	0	0	83	8	18
11	−1	0	1	74	17	33
12	1	0	−1	77	6	39
13	−1	−1	0	70	8	30
14	1	−1	0	100	22	53
15	1	1	0	68	32	50
16	0	1	−1	66	19	44
17	0	0	0	85	10	14

4.3.4 回归模型建立与显著性检验

根据表3建立铺放角y_1、角度差y_2、根差y_3的二次多项式以及甩麻转速、行车速度、割刀转速回归模型为

$$y_1 = 84.8 + 7.63A - 10.05B + 4.63C - 5.50AB - 3.75AC + 2.00BC - 11.03A^2 + 0.7250B^2 - 2.02C^2 \tag{33}$$

$$y_2 = 6.80 + 0.25A + 9.63B + 5.63C - 6.50AB + 4.50AC + 4.75BC + 6.98A^2 + 12.73B^2 + 2.22C^2 \tag{34}$$

$$y_3 = 15.20 + 6.00A + 1.62B + 0.8750C - 3.25AB - 2.75AC + 2.50BC + 7.65A^2 + 20.40B^2 + 10.40C^2 \tag{35}$$

方差分析结果如表4~6所示。

由表4~6可知,回归方程F分别为33.65、34.86、43.29,P均小于0.000 1,表明回归模型极显著。失拟项

表4 铺放角y_1回归模型方差分析

Tab. 4 Spread angle y_1 regression model ANOVA

项目	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 251.95	9	250.22	33.65	<0.000 1
A	465.13	1	465.13	62.55	<0.000 1
B	882.00	1	882.00	118.62	<0.000 1
C	171.13	1	171.13	23.01	0.002 0
AB	121.00	1	121.00	16.27	0.005 0
AC	56.25	1	56.25	7.56	0.028 5
BC	16.00	1	16.00	2.15	0.185 8
A^2	511.79	1	511.79	68.83	<0.000 1
B^2	2.21	1	2.21	0.2976	0.602 3
C^2	17.27	1	17.27	2.32	0.171 4
残差	52.05	7	7.44		
失拟	29.25	3	9.75	1.71	0.301 9
误差	22.80	4	5.70		
总和	2 304.00	16			

表5 角度差y_2回归模型方差分析

Tab. 5 Angle difference y_2 regression model ANOVA

项目	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2 310.21	9	256.69	34.86	<0.000 1
A	0.500 0	1	0.50	0.067 9	0.801 9
B	741.12	1	741.12	100.64	<0.000 1
C	253.13	1	253.13	34.37	0.000 6
AB	169.00	1	169.00	22.95	0.002 0
AC	81.00	1	81.00	11.00	0.012 8
BC	90.25	1	90.25	12.26	0.010 0
A^2	204.84	1	204.84	27.82	0.001 2
B^2	681.79	1	681.79	92.58	<0.000 1
C^2	20.84	1	20.84	2.83	0.136 4
残差	51.55	7	7.36		
失拟	28.75	3	9.58	1.68	0.307 2
误差	22.80	4	5.70		
总和	2361.76	16			

表6 根差y_3回归模型方差分析

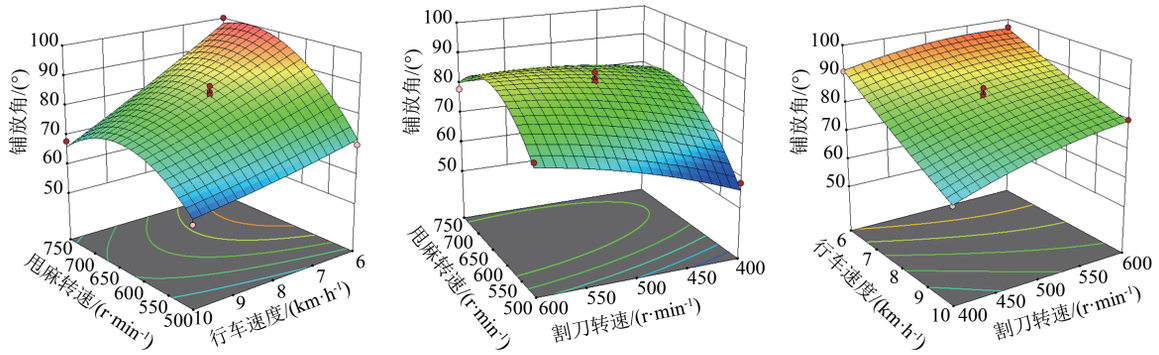
Tab. 6 Root difference y_3 regression model ANOVA

项目	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3 091.98	9	343.55	43.29	<0.000 1
A	288.00	1	288.00	36.29	0.000 5
B	21.13	1	21.13	2.66	0.146 8
C	6.13	1	6.13	0.771 8	0.408 8
AB	42.25	1	42.25	5.32	0.054 4
AC	30.25	1	30.25	3.81	0.091 8
BC	25.00	1	25.00	3.15	0.119 2
A^2	246.41	1	246.41	31.05	0.000 8
B^2	1 752.25	1	1 752.25	220.81	<0.000 1
C^2	455.41	1	455.41	57.39	0.000 1
残差	55.55	7	7.94		
失拟	40.75	3	13.58	3.67	0.120 6
误差	14.80	4	3.70		
总和	3 147.53	16			

P分别为0.301 9、0.307 2、0.120 6，均大于0.05，表明回归模型拟合度高。因此，3个模型可以较好地反映各因素与响应值的关系并预测最佳作业参数。

4.3.5　响应曲面分析

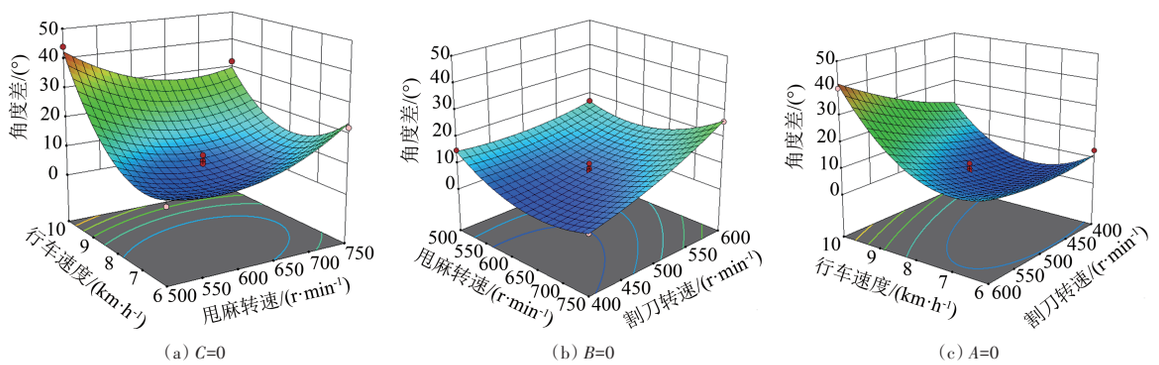
通过Design-Expert 13软件得到各试验因素之间显著交互作用对各指标影响的响应曲面，如图12~14所示。



(a) C=0　(b) B=0　(c) A=0

图12　因素交互作用对铺放角的影响响应曲面

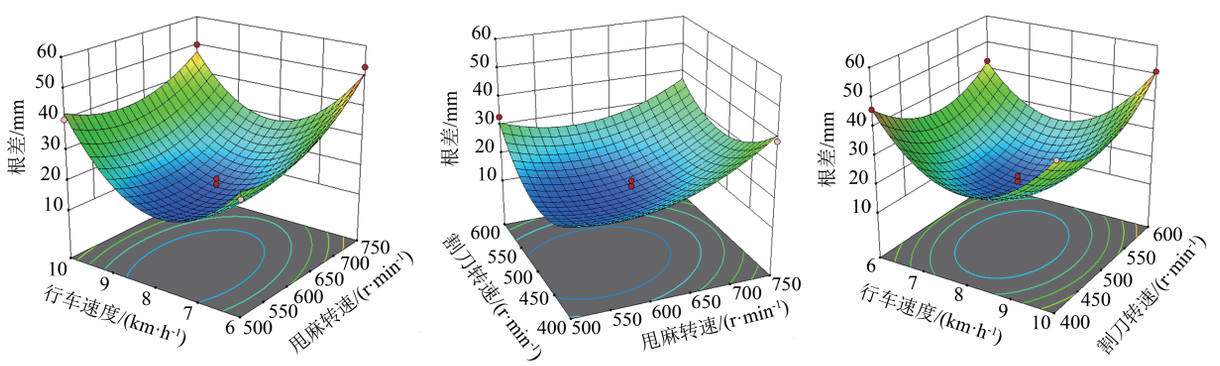
Fig. 12　Response surfaces for effect of factor interaction on lay angle



(a) C=0　(b) B=0　(c) A=0

图13　因素交互作用对角度差的影响响应曲面

Fig. 13　Response surfaces for effect of factor interactions on angular aberration



(a) C=0　(b) B=0　(c) A=0

图14　因素交互作用对根差的影响响应曲面

Fig. 14　Response surfaces for effect of factor interactions on root differences

图12为各因素交互作用对铺放角影响的响应曲面。由图12a可知，当行车速度一定时，铺放角随着甩麻转速的增加呈先增后减趋势；当甩麻转速一定时，铺放角随着行车速度的减小呈递增趋势。从等高线可以看出当甩麻转速取650 r/min、行车速度为7 km/h时，铺放角达到最优。由图12b可知，当割刀转速一定时，铺放角随甩麻转速的增加呈先增后减趋势；当甩麻转速一定时，割刀转速对铺放角的影响不显著。从等高线可以看出当甩麻转速取650 r/min，割刀转速为600 r/min时，铺放角达到最优。由图12c可知，当割刀转速一定时，铺放角随着行车速度增大呈递减趋势。割刀转速较行车速度的影响不显著。从等高线可以看出当行车速度取7 km/h左右时，铺放角达到最优。

图13为各因素交互作用对角度差的影响的响应曲面。由图13a可知，当行车速度一定时，角度差随着甩麻转速的增加呈先减后增趋势；当甩麻转速一定时，角度差随着行车速度增加呈明显的先减后增趋势。从等高线可以看出当甩麻转速取600 r/min，行车速度7 km/h时

角度差达到最小。由图13b可知,甩麻转速较割刀转速对角度差的影响较为显著。从等高线可以看出当割刀转速取400 r/min,甩麻转速为600 r/min左右时角度差达到最小。由图13c可知,当割刀转速一定时,角度差随行车速度的减小呈明显的先减后增趋势;当行车速度一定时角度差随着割刀转速的减小呈递减趋势。从等高线可以看出当行车速度取7 km/h、割刀转速取400 r/min时,角度差最小。

图14为各因素交互作用对角度差的影响的响应曲面。由图14a可知,当甩麻转速一定时,根差随着行车速度增大呈先减后增趋势;当行车速度一定时,根差随着甩麻转速增大呈先减后增趋势。可以看出,当行车速度取8 km/h、甩麻转速600 r/min时,根差达到最小。由图14b可知,当割刀转速一定时,根差随着甩麻转速增加呈先减后增趋势,甩麻转速较割刀转速对根差的影响较显著。可以看出,当甩麻转速取600 r/min、割刀转速500 r/min时根差达到最小。由图14c可知,随着行车速度减小,根差缓慢下降又逐渐升高;随着割刀转速减小,根差呈先减后增趋势;可以看出当割刀转速为500 r/min、行车速度8 km/h时,根差最小。

4.3.6 参数组合优化

利用Design-Expert 13软件对建立的二次回归正交试验进行优化分析,建立优化目标函数

$$\begin{cases} y_1 = 90^\circ \\ \min y_2 \\ \min y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant A \leqslant 1 \\ -1 \leqslant B \leqslant 1 \\ -1 \leqslant C \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{36}$$

得出最优参数组合为:甩麻转速628 r/min、行车速度7.3 km/h、割刀转速503 r/min,此时麻秆铺放角为89.02°、角度差为5.16°、根差为17.46 mm。

4.3.7 验证试验

为了验证优化结果正确性,对得出的最优参数组合进行试验,调节大麻割铺机甩麻转速为628.08 r/min、行车速度为7.28 km/h和割刀转速为502.73 r/min条件下进行测试。

以最佳切割参数组合为依据,对各项指标进行重复试验3次,采集数据进行人工处理取平均值,试验结果如表7所示。

表7 理论优化与试验验证结果对比

Tab. 7 Comparison of theoretical optimization and experimental validation results

项目	铺放角度y_1/(°)	角度差y_2/(°)	根差y_3/mm
理论值	89.02	5.16	17.46
试验值	88.20	4.95	18.35
相对误差/%	0.93	4.24	4.85

由表7可知,铺放角、角度差和根差理论值与试验值相对误差分别为0.93%、4.24%、4.85%,均小于5%,优化结果可靠。

5 结论

(1)对分禾装置进行理论分析计算,得到理想状态甩麻转速为107.17~283.09 r/min;对割刀装置进行运动学和动力学理论分析计算,得到配重质量为6.672 kg。

(2)田间试验结果表明,最佳参数组合为:甩麻转速628.08 r/min、行车速度7.28 km/h、割刀转速502.73 r/min;此时麻秆铺放角、角度差和根差分别为89.02°、5.16°和17.46 mm,能够满足收获作业质量要求。

(3)基于最优参数进行田间试验验证,测定割台麻秆铺放角度为88.20°、角度差为4.95°、根差为18.35 mm,相对误差不大于4.85%,试验结果表明,设计的割台各项性能参数满足技术标准要求。

参 考 文 献

[1] 唐斌,李显旺,袁建宁,等.工业大麻微型收获机械的技术与发展分析[J].中国农机化学报,2018,39(2):17-21.
TANG Bin, LI Xianwang, YUAN Jianning, et al. Analysis of technology and development for hemp micro-harvestingmachinery [J]. Journal Chinese Agricultural of Mechanization, 2018,39(2):17-21. (in Chinese)

[2] 王德明,张晓青,朱士强,等.工业大麻应用及种植技术装备发展现状[J].农业工程,2023,13(9):20-25.
WANG Deming, ZHANG Xiaoqing, ZHU Shiqiang, et al. Development status of industrial hemp application and planting technology and equipment [J]. Agricultural Engineering, 2023,13(9): 20-25. (in Chinese)

[3] 张明,张利国,房郁妍,等.黑龙江省工业大麻产业现状及未来发展建议[J].黑龙江农业科学,2020(12):123-125.
ZHANG Ming, ZHANG Liguo, FANG Yuyan, et al. Current situation and future development suggestions of hemp industry in Heilongjiang Province[J].Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020,(12):123-125. (in Chinese)

[4] 向伟,马兰,刘佳杰,等.工业大麻初加工技术及装备研究进展[J].中国农机化学报,2022,43(6):96-103.
XIANG Wei, MA Lan, LIU Jiajie, et al. Research progress on primary processing technology and equipment of industrial hemp [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(6): 96-103. (in Chinese)

[5] 周杨,李显旺,沈成,等.工业大麻机械化收割技术的研究[J].农机化研究,2017,39(2):253-258.
ZHOU Yang, LI Xianwang, SHEN Cheng, et al. Research of industrial hemp mechanization harvester technology [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(2): 253-258. (in Chinese)

[6] 张雪,王世发,王庆峰,等.不同栽培方式对工业大麻产量性状的影响[J].北方农业学报,2019,47(5):20-23.
ZHANG Xue, WANG Shifa, WANG Qingfeng, et al. Effects of different cultivation modes on the yield characteristics of industrial hemp

[J].Journal of Northern Agriculture, 2019,47(5):20 - 23. (in Chinese)
[7] 向伟, 马兰, 刘佳杰, 等. 工业大麻生产全程机械化技术研发现状与展望 [J]. 中国麻业科学, 2021,43(6): 320 - 332.
XIANG Wei, MA Lan, LIU Jiajie, et al. Review on technology and equipment of mechanization for industrial hemp in China[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2021,43(6):320 - 332. (in Chinese)
[8] 刘雪强,刘阳,粟建光,等.中国汉麻综合利用技术与产业化进展[J].中国麻业科学, 2019,41(6):283 - 288.
LIU Xueqiang, LIU Yang, SU Jianguang, et al. Progress incomprehensive utilization technology and industrialization of hemp in China [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2019,41(6):283 - 288. (in Chinese)
[9] 马兰,龙超海,刘佳杰,等.国内外工业大麻加工处理机械发展现状[J].安徽农业科学, 2017,45(19):205 - 213,217.
MA Lan, LONG Chaohai, LIU Jiajie, et al. The development status of industrial hemp stalk processing machinery at home and abroad [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017,45(19): 205 - 213, 217. (in Chinese)
[10] 高金虎,赵铭森,冯旭平,等. 不同密度和行距配置对工业大麻生长及产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2019,24(7):37-43.
GAO Jinhu, ZHAO Mingsen, FENG Xuping, et al. Effects of planting density and row spacing on the growth and yield of industrial hemp [J]. Journal of China Agricultural University, 2019,24(7):37 - 43. (in Chinese)
[11] 李晓平,陈冲. 工业大麻秆的显微构造的纤维形态研究[J]. 纤维素科学与技术, 2010,18(3):28 - 33,38.
LI Xiaoping, CHEN Chong. The micro-structure and fiberconfiguration of industry hemp stalks [J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2010,18(3):28 - 33,38. (in Chinese)
[12] 苏工兵, 刘俭英, 王树才, 等. 苎麻茎秆木质部力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2007,38(5):62 - 65.
SU Gongbing, LIU Jianying, WANG Shucai, et al. Study on mechanical properties of xylem of ramie stalk [J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(5):62 - 65. (in Chinese)
[13] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 胡麻茎秆生物力学特性试验[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(11):45 - 50.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Biomechanical properties test of flax stem[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018,39(11):45 - 50.(in Chinese)
[14] 马兰,刘佳杰,向伟,等.工业大麻干茎加工处理试验研究[J].中国麻业科学, 2020,42(6):263 - 272.
MA Lan, LIU Jiajie, XIANG Wei, et al. Experimental study on processing and treatment of dry stalks of industrial hemp [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2020,42(6):263 - 272.(in Chinese)
[15] 黄继承,沈成,纪爱敏,等.工业大麻收割机切割-输送关键部件作业参数优化[J].吉林大学学报(工学版), 2021,51(2):772 - 780.
HUANG Jicheng, SHEN Cheng, JI Aimin, et al. Optimization of cutting conveying key working parameters of hemp harvester [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021,51(2):772 - 780.(in Chinese)
[16] HENRYK B R, YSZARD K. New technology of harvesting hemp grown for seed[J].Journal of Industrial Hemp,2005,10(1) : 49 - 60.
[17] HUANG J C, SHEN C, LI X W, et al. Design and tests of hemp harvester[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(2): 117 - 127.
[18] SHEN C, ZHANG B, HUANG J C, et al. Research status and suggestions of mechanical harvesting technology for high-stalk bast-fiber crops[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2020,29(2) : 269 - 284.
[19] MARROT A L, LEFEUVRE B, PONTOIR E, et al, Analysis of the hemp fiber mechanical properties and their scattering [J]. Industrial Crops and Products, 2013,51: 317 - 327.
[20] 韩增德,郝朝会,邓志刚,等. 自走式大麻割铺机: ZL202022763496. 1[P]. 2021-09-07.
[21] 郝付平,陈志,张子瑞,等.拨禾星轮式玉米收获台设计与试验[J].农业机械学报, 2014,45(6):112 - 117.
HAO Fuping,CHEN Zhi,ZHANG Zirui,et al. Design and experiment of corn harvester head with reel star wheel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):112 - 117.(in Chinese)
[22] 田昆鹏,李显旺,沈成,等.天牛仿生大麻收割机切割刀片设计与试验[J].农业工程学报, 2017,33(5):56 - 61.
TIAN Kunpeng, LI Xianwang, SHEN Cheng, et al. Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(5):56 - 61.(in Chinese)
[23] 贺华鹏. 芦苇收割机割台关键部件参数优化研究[D]. 北京:中国农业科学院,2020.
HE Huapeng .Optimization of cutting-conveying key working parameters of hemp harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)
[24] 郝朝会,杨学军,刘立晶,等.果园多功能动力底盘设计与试验[J].农业机械学报, 2018,49(12):66 - 73,92.
HAO Zhaohui, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of multifunctional dynamic chassis for orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):66 - 73,92. (in Chinese)
[25] SALENTIJN ELMA M J, ZHANG Qingying, AMADUCCI S, et al. New development s in fiber hemp(*Cannabis sativa* L.) breeding[J]. Industrial Crops and Products, 2015,68: 32 - 41.
[26] CHATOPADHYAY P S, PANDEY K P. Mechanical properties of sorghum stalk in relation to quasi-static deformation[J]. J. Agric. Res, 1999,73(2):199 - 206.
[27] DOGHERTY M J O, HUBERT J DYSON A, et al. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw [J]. Jounal of Agricultural Engneering Research, 1995,62:133 - 142.
[28] FARMAN A C, JI Changying, TAGAR A A, et al. Comparison of mechanical properties of wheat and rice straw influenced by loading rates[J]. African Journal of Biotechnology, 2013,12 (10) :1068 - 1077.
[29] Q/CP XDNZ0001-2020大麻割铺机[S]. 现代农装科技股份有限公司企业标准, 2020.