文章编号:1000-7601(2025)05-0290-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.29

工业大麻割铺机铺放机理与试验研究

郝朝会[1,3,4],吴宗剑[1],陈宏圣[2],于靖博[3],肖作岭[3],
周 涛[4],张焱栋[4],徐天宇[4]

(1. 新疆农业大学机电工程学院,新疆,乌鲁木齐 830052;2. 泰山学院机械工程学院,山东 泰安 271000;
3. 中农机(北京)科技发展有限公司,北京 102206;4. 新疆工程学院控制工程学院,新疆 乌鲁木齐 830023)

摘 要:为解决工业大麻割铺机在作业过程中出现堵塞、铺放质量差等问题,对行车速度和甩麻速度影响铺放角的规律和机理进行研究。通过理论分析计算,得到了铺放角理论公式及植株不向割台倾倒的条件:当行车速度为 3 km·h^{-1},理论甩麻速度≥149.59 r·min^{-1};基于 MATLAB 仿真分析得到:甩麻转速一定时,铺放角随行车速度增大而减小,且甩麻转速越低其减小速率越快;行车速度一定时,铺放角随甩麻转速的增大而增大,且行车速度越高其增大速率越快。通过田间试验,得到理论铺放角和试验铺放角的相对误差在 5%置信区间内,验证了修正系数 $k=0.9$ 可信;得到最佳参数组合为:甩麻转速为 306.90 r·min^{-1},行车速度为 5.73 km·h^{-1},该参数组合下麻秆铺放角、角度差和根差分别为 89.44°、7.66°、20.47 mm,基于最优参数组合,将大麻割铺机甩麻转速和行车速度分别调整为 306 r·min^{-1}、5.7 km·h^{-1}进行田间试验验证,测得工业大麻铺放角为 88.6°、角度差为 7.9°、根差为 20.78 mm,其相对误差均小于 5%。田间试验结果表明:铺放角理论公式可信,可为工业大麻的机械化收割提供参考。

关键词:工业大麻收获;割铺机;铺放机理;铺放角
中图分类号:S563.3; S225.91 **文献标志码**:A

Laying mechanism and experiment of industrial hemp windrower

HAO Zhaohui[1,3,4], WU Zongjian[1], CHEN Hongsheng[2], YU Jingbo[3],
XIAO Zuoling[3], ZHOU Tao[4], ZHANG Yandong[4], XU Tianyu[4]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang* 830052, *China*;
2. *School of Mechanical Engineering, Taishan University, Tai'an, Shandong* 271000, *China*;
3. *China Agricultural Machinery (Beijing) Technology Development Co., Ltd., Beijing* 102206, *China*;
4. *School of Control Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang* 830023, *China*)

Abstract: Aimed at the problems such as blockage and poor laying quality of the industrial hemp windrower, the mechanisms of how the traveling speed and hemp-throwing speed affected the laying angle were studied. Through theoretical analysis and calculation, the theoretical formula of the laying angle and the conditions for the plants not to topple towards the cutting platform were obtained: when the traveling speed was 3 km·h^{-1}, and the theoretical hemp-throwing speed ≥149.59 r·min^{-1}. Obtained through MATLAB simulation analysis that when the hemp-throwing rotational speed was constant, the laying angle decreased as the traveling speed increased, and the lower the hemp-throwing rotational speed was, the faster the decreasing rate; when the traveling speed was constant, the laying angle increased as the hemp-throwing rotational speed increased, and the higher the traveling speed was, the faster the increasing rate. Through field experiments, it was obtained that the relative error between the theoretical laying angle and the experimental laying angle was within the 5% confidence interval, which verified that the correction coefficient $k=0.9$ was reliable. The optimal parameter combination was obtained: the hemp-thro-

收稿日期:2024-11-07 **修回日期**:2025-01-09
基金项目:新疆维吾尔自治区博士后资助项目(10062300211);新疆维吾尔自治区重点研发专项(2022B02023);大学生创新创业训练计划项目(国家级项目 202310994002,省级项目 S202310994018)
作者简介:郝朝会(1984-),男,山东枣庄人,教授,主要从事智能农机装备研究。E-mail:kkk-875@163.com
通信作者:陈宏圣(1968-),男,山东泰安人,副教授,主要从事机电一体化研究。E-mail:13853809060@163.com

wing rotational speed was 306.90 r · min^{-1}, and the traveling speed was 5.73 km · h^{-1}. Under this parameter combination, the hemp stalk laying angle, angle difference, and root difference were 89.44°, 7.66°, and 20.47 mm. Based on the optimal parameter combination, the rotating speed and driving speed of the hemp cutting and paving machine were adjusted to 306 r · min^{-1} and 5.7 km · h^{-1}, respectively, for field test verification. The measured industrial hemp laying angle was 88.6°, the angle difference was 7.9°, and the root difference was 20.78 mm, and their relative errors were all less than 5%. The results of the field tests showed that the theoretical formula of the laying angle was reliable and could provide a theoretical reference for the mechanized harvesting of industrial hemp in China.

Keywords: industrial hemp harvest; windrower; laying mechanism; laying angle

我国是工业大麻种植面积最大的国家,其种植面积约占全世界的一半。工业大麻适应性强易于种植且生长速度快,在纺织、造纸、医药、食品饲料、建筑材料和汽车装饰等领域,具有广阔的发展前景[1]。云南省在药用工业大麻方面具有品种和种植条件的优势,每年不同用途的工业大麻种植面积大约 1.0×10^5 hm^2;黑龙江省种植纤维用工业大麻的面积和产量较大,近几年,每年的种植面积在 2.0×10^5 hm^{2}以上。工业大麻作为东北地区的重要经济作物,近年来种植面积逐步扩大。

随着工业大麻产业的快速发展,对其收获环节的机械化需求日益迫切。铺放角是评价工业大麻割晒铺放质量的重要指标之一,影响作业性能,研究割铺机的铺放机理可为割铺机设计与优化提供依据[2]。

国外已研发出多种类型的工业大麻收割机械。国外学者开展基于切割原理与刀具设计优化、整机工作性能、切割高度、作物特性等方面的研究。国内的研究人员做了大量研究工作,舒彩霞等[3]认为我国南方芦苇重心较高(一般在 1.7 m 左右),按照其生长密度、在输送链上的积聚密度来确定输送拨齿的间隔,高度方向设计为 4 层,横向间距为 210 mm。输送速度为 1.61 m · s^{-1},机组作业速度为 0.933 m · s^{-1},其合速度有利于保证铺放质量。廖庆喜等[4]针对芦苇收割机前进速度与输送带转速进行研究,在分析收割量与输送量关系的基础上,得到收割机前进速度与输送带转速匹配关系。景枫等[5]针对玉米茎秆的横向输送展开研究,借助高速摄影技术观察其运动过程,并借助双拨齿式输送装置,通过正交试验、单因素试验和较优参数的验证试验,得到了输送装置结构参数、运动参数之间的相互关系。

综上所述,研究人员在割铺机铺放机理的研究方面取得了一定的成果,但尚未有针对工业大麻割铺机铺放机理进行系统分析。工业大麻在机械化割铺作业中出现堵塞、铺放质量差等问题,参考芦苇、玉米等高秆作物的铺放机理进行分析,结合工业大麻作物的特点,通过理论分析计算、MATLAB 验证以及田间试验研究,对工业大麻割铺机铺放过程及机理进行研究,旨在为工业大麻机械化收获提供设计参考。

1　工业大麻植株特性

工业大麻植株茎秆通常较为粗壮且挺直,基部圆形,中上部具较浅的纵沟,高度普遍可达 2 m 以上,茎粗 6~45 mm,枝杈少,为纤维等的提取提供了充足的原料。叶子呈掌状分裂,一般有 5~9 个裂片,边缘带锯齿状,颜色深绿且叶片相对厚实,花朵多为绿色或黄绿色的穗状花序。东北地区生长周期大致为 3~4 个月,根为直根系分布在 20~40 cm 的土层中。工业大麻的颈部从外向内为表层、皮层、次生皮层、韧皮部、形成层、木质部和髓,纤维束大多位于次生皮层。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[6]。

2　工业大麻铺放过程分析

根据工业大麻在机械化割铺作用中植株的运动过程和受力情况,可将工业大麻的铺放过程视作两个连续的过程,即工业大麻植株被抛离割台至植株底部接触到地面的下落过程和工业大麻植株以落地点为转动点绕植株底部转动至植株铺放于地面的转动过程。

2.1　植株抛出瞬间分析

以拨齿与禾秆接触点为坐标原点建立坐标系(图 1),其中 x 轴正方向为横向输送速度方向,y 轴正方向为割晒机前进方向。

当禾秆越过线 AO 之后,由直线运动转变为随拨齿圆周运动,可根据工业大麻植株位于拨齿位置处分为两种情况:工业大麻植株位于拨齿顶部时,不会产生滑移而直接将植株抛出;工业大麻植株位于拨齿根部时,在抛送过程中离心力的作用下,滑

移至拨齿顶部后将其抛出。

2.1.1 直接抛出 当工业大麻植株恰好位于拨齿齿顶时,工业大麻植株可能不会产生滑移,而是直接被抛出,此时工业大麻植株底部在 x、y 方向的速度为:

$$\begin{cases} v_{x1} = v_s = \omega r_e \\ v_{y1} = v_m \end{cases} \tag{1}$$

式中,v_{x1}为植株不发生滑移时在 x 方向的速度(m·s^{-1});v_{y1}为植株不发生滑移时在 y 方向的速度(m·s^{-1});v_s为横向输送速度(m·s^{-1});v_m为机器前进速度(m·s^{-1});ω 为甩麻带轮角速度(r·min^{-1});r_e为拨齿齿顶半径(m)。

麻杆在割台上传输到一端抛出的过程中,由弹齿压在两个拨齿和割台平面上,抛出的瞬间,根据实际作业经验,直接抛出的植株较少,以滑移抛出为主。

2.1.2 滑移抛出 当工业大麻植株位于拨齿齿根时,拨齿的禾秆一方面随拨齿转动,一方面沿拨齿向外滑动,产生滑移,假设当植株由齿根滑移至齿顶处时被抛出。其运动情况如图2所示。禾秆回转的圆周速度 v 为 ωr,由于禾秆沿拨齿向外滑动,故 r 是变化的,因此 ωr 也是变化的[7]。其变化速率即为禾秆的切向加速度:

$$\frac{d(\omega r)}{dt} = \omega \frac{dr}{dt} \quad (\text{以 } \omega r' \text{ 表示}) \tag{2}$$

若禾秆的质量为 m,禾秆与拨齿间的摩擦系数为 f,则离心力为 $F_a = m\omega^2 r$,法向反力为 $N = m\omega r'$,摩擦力 $F = fN = fm\omega r'$。在离心力大于摩擦力的情况下,禾秆将沿拨齿向外滑动,据此可列方程:

$$mr'' = m\omega^2 r - mf\omega r' \tag{3}$$

即 $$r'' + f\omega r' - \omega^2 r = 0$$

以 AO 线为转动的起始位置,齿顶的半径为 r_e,齿根的半径为 r_0,则初始条件为:

当 $t=0$ 时,$r=r_0$,$r'=0$。可得:

$$r = r_0 e^{-\frac{f}{2}\omega t}\left(\cosh\frac{\sqrt{f^2+4}}{2}\omega t + \frac{f}{\sqrt{f^2+4}}\sinh\frac{\sqrt{f^2+4}}{2}\omega t\right) \tag{4}$$

求导可得:

$$r' = \omega r_0 e^{-\frac{f}{2}\omega t}\frac{2}{\sqrt{f^2+4}}\sinh\frac{\sqrt{f^2+4}}{2}\omega t \tag{5}$$

式中,h 为割茬高度(m)。(4)和(5)式相除得:

$$r' = \frac{2\omega r}{\sqrt{f^2+4}\coth\frac{\sqrt{f^2+4}}{2}\omega t + f} \tag{6}$$

当禾秆滑至拨齿顶部时,$r=r_e$,被抛出时的径向速度为:

$$r'_e = \frac{2\omega r_e}{\sqrt{f^2+4}\coth\frac{\sqrt{f^2+4}}{2}\omega t + f} \tag{7}$$

式中,f、ω、r_e均为常数,令 $\varphi=\omega t$,则:

$$r'_e = \frac{2\omega r_e}{\sqrt{f^2+4}\coth\frac{\sqrt{f^2+4}}{2}\varphi + f} \tag{8}$$

切向速度为 $v_e = \omega r_e$。

当禾秆滑至拨齿顶部被抛出时(图3),工业大麻植株底部在 x、y 方向的速度为:

$$\begin{cases} v_{x2} = v_{ex} + r'_{ex} = \omega r_e\left(\cos\varphi + \dfrac{2\sin\varphi}{\sqrt{f^2+4}\coth\dfrac{\sqrt{f^2+4}}{2}\varphi + f}\right) \\ v_{y2} = v_m + r'_{ey} - v_{ey} = v_m + \omega r_e\left(\dfrac{2\cos\varphi}{\sqrt{f^2+4}\coth\dfrac{\sqrt{f^2+4}}{2}\varphi + f} - \sin\varphi\right) \end{cases} \tag{9}$$

式中,φ 为植株由拨齿底部滑移至顶部过程中拨齿转过的角度(°);v_{x2}、v_{y2}分别为植株发生滑移时在 x 方向和 y 方向的速度(m·s^{-1})。

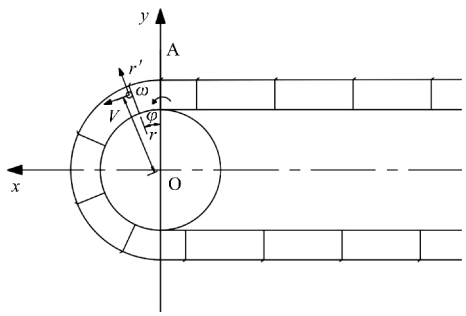

图1 输送时禾秆运动

Fig.1 Straw movement during conveyance

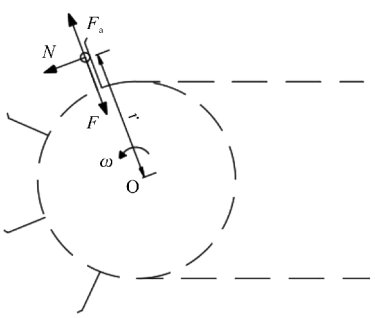

图2 输送时禾秆受力情况

Fig.2 Force condition of the straw during conveying

2.2 植株下落过程分析

工业大麻植株在下落过程中的运动为三维空间内的平抛运动,以植株离开割台瞬间最下端在地面的投影点为坐标原点 O_1 建立笛卡尔坐标系,x 轴正方向为横向输送速度方向,y 轴正方向为割铺机

前进方向,z 轴垂直向上。工业大麻植株平抛运动在 3 个方向的运动分别为:x、y 方向分别为与植株抛出瞬间 x 和 y 方向速度相等的匀速运动,z 方向为初速度为 0 的自由落体运动[2]。工业大麻植株下落过程中植株底端在 3 个方向上的坐标为:

$$\begin{cases} x_{\mathrm{d}} = v_{xi}t \\ y_{\mathrm{d}} = v_{yi}t \\ z_{\mathrm{d}} = h - gt^2/2 \end{cases} \tag{10}$$

当工业大麻植株底部着地时,$z_{\mathrm{d}} = 0$,可知工业大麻植株下落时间 $t = \sqrt{2h/g}$,则植株着地时底部的速度为:

$$\begin{cases} v_x = v_{xi} \\ v_y = v_{yi} \\ v_z = -\sqrt{2gh} \end{cases} \tag{11}$$

式中,v_x 为工业大麻植株底部在 x 方向的速度(m·s^{-1});v_y 为工业大麻植株底部在 y 方向的速度(m·s^{-1});v_z 为工业大麻植株底部在 z 方向的速度(m·s^{-1})。

合速度　　$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$　　(12)

2.3　植株转动过程分析

工业大麻植株落地点为 O_2,根据碰撞理论,可将工业大麻植株底部与地面接触过程看做斜碰撞过程,结合工业大麻田的实际情况,可假设工业大麻植株与地面发生完全塑性碰撞,植株底部落地后,由刚体平动变为绕 O_2 点的定轴转动[8-11]。

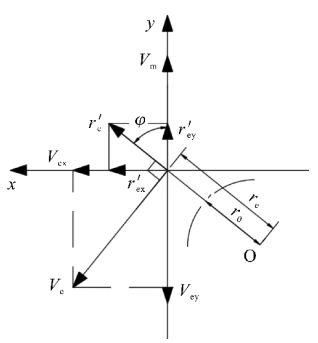

图 3　产生滑移时禾秆抛出的速度

Fig.3　Speed at which the sliding straw is ejected

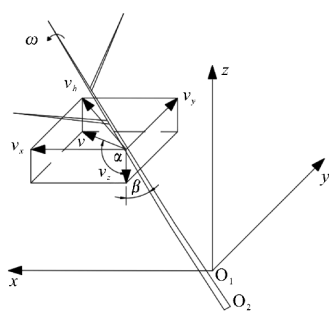

图 4　植株转动过程

Fig.4　Plant rotation process

由图 4 可知合速度 v 与 z 轴的夹角为:

$$\alpha = \sqrt{\frac{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}{2gh}} \tag{13}$$

合速度 v 与植株的夹角为:

$$\varepsilon = \alpha + \beta \tag{14}$$

式中,β 为植株倾角,(°)。

为简化运算,理想状态下,着地瞬间工业大麻植株的动量守恒方程为:

$$J\omega_1 - ml_0 v\sin\beta = 0 \tag{15}$$

可得着地后工业大麻植株的角速度为:

$$\omega_1 = \frac{ml_0\sin\beta\sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}}{J} \tag{16}$$

其中　　$J = \frac{4}{3}ml_0^2$

式中,l_0 为质心到底部的距离(m);J 为植株对 O_2 点的转动惯量(kg·m^2)。

工业大麻植株被抛出后保持直立状态,与地面接触后发生转动,根据能量守恒定律可得:

$$mgl_0 - mgl_0\cos\beta = \frac{1}{2}J\omega_{\min}^2 \tag{17}$$

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{3g(1-\cos\beta)}{2l_0}} \tag{18}$$

式中,$\omega_{\min}$ 为工业大麻植株不倒向割台的最小角速度。

植株落地后定轴转动角速度需满足 $\omega_1 \geqslant \omega_{\min}$,整理后可得工业大麻植株落地后向机器外侧铺放而不是倒向割台的条件为:

$$v_{xi}^2 + v_{yi}^2 \geqslant \frac{8gl_0(1-\cos\beta)}{3\sin^2\beta} \tag{19}$$

根据工业大麻割铺作业实际情况,当前进速度为 3 km·h^{-1}时,理论甩麻转速≥149.59 r·min^{-1}。

由植株下落过程和底部着地转动过程分析可知,麻杆底部着地瞬间速度和植株底部着地向外侧转动过程中对铺放角影响较小,假设不产生影响;此过程对铺放角的影响以最后铺放角理论公式系统修正系数进行修正。

2.4　铺放角理论分析和仿真

设工业大麻植株落地后,质心速度 v 的水平分速度为 v_{h},工业大麻铺放角为 v_{h} 与 v_{y} 的夹角,即:

$$\gamma = \arccos\frac{v_{yi}}{\sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}} \tag{20}$$

为探究割铺机行车速度、甩麻转速对工业大麻植株理论铺放角变化的影响机理,结合生产作业实际,选取行车速度为 4~8 km·h^{-1},甩麻转速为 250~425 r·min^{-1}进行计算,并通过 Matlab 绘制行车速

度、甩麻转速对理论铺放角影响的三维曲面图，如图 5 所示。从图中可知当甩麻转速一定时，铺放角随行车速度增大而呈现减小的趋势，且甩麻转速越低其减小速率越快；行车速度一定时，铺放角随甩麻转速的增大而呈现增大的趋势，且行车速度越高其增大速率越快。

式(20)为理想状态下的铺放角计算公式，考虑到现实作业中风阻等其他因素，增加修正系数 k 对铺放角计算公式进行修正，根据实际作业状态以及采收经验选取 $k=0.9$。即：

$$\psi = k\gamma = 0.9\arccos\frac{v_{yi}}{\sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}} \tag{21}$$

式中，ψ 为修正后的铺放角(°)。

为验证铺放角理论公式和实际作业中的铺放角准确性，利用响应面方法的中心组合设计试验，并进行田间试验验证。

3 田间试验

3.1 中心组合设计试验

本文参照 GB /T 8097—2008《收获机械 · 联合收割机试验方法》[12]、GB/T 5262-2008《农业机械试验条件 测定方法的一般规定》[13]、《Q/CP XD-NZ0001-2020 大麻割铺机》(企业标准)规定的试验方法进行田间试验。

于 2022 年 8—9 月在黑龙江省齐齐哈尔市克山县北联镇大麻种植基地开展田间试验，田间调查数据如表 1 所示。

采用 Design-Expert 软件，利用响应面方法的中心组合设计考察甩麻转速和行车速度两个因素，每个因素取 5 个水平，采用-3、-1、0、1、3 进行编码，麻秆的铺放角、角度差、根差作为响应值，对试验进行设计，如表 2 所示。

表 1 克山县大麻种植基地田间调查表

Table 1 Field survey of hemp planting base in Keshan County

大麻品种 Cannabis variety	种植方式 Cultivation method	植株高度/mm Plant height	直径/mm Diameter	单株质量/g Mass per plant	行距/mm Row spacing	种植密度/(株 · m^{-2}) Planting density /(plant · m^{-2})
汉麻 1 号 Hanma No.1	机种条播 Mechanical drilling-sowing in rows	3050	11	16.1	12	293

3.2 试验结果

按照中心组合设计所设计的 13 组试验方案进行试验，试验方案与试验结果如表 3 所示[14-15]。

表 2 中心组合设计因素水平表

Table 2 Central composite design factor-level table

水平 Level	甩麻转速/(r · min^{-1}) Rotational speed of hemp throwing	行车速度/(km · h^{-1}) Operating traveling speed
-3	250	4.5
-1	300	5.5
0	325	6.0
1	350	6.5
3	400	7.5

表 3 中心组合设计试验结果

Table 3 Central composite design experimental results

序号 Number	A	B	η_1	η_2	η_3
1	1	1	87.5	9	22
2	0	0	90.5	6	20
3	-1	-1	88.0	9	22
4	0	3	81.0	13	32
5	0	-3	89.5	8	21
6	0	0	90.0	6	20
7	0	0	92.0	5	16
8	-3	0	80.5	18	38
9	3	0	88.0	9	26
10	-1	1	86.5	10	27
11	0	0	90.5	7	19
12	1	-1	93.0	5	19
13	0	0	91.0	5	18

为了验证铺放角理论公式的准确性，将试验铺放角与理论铺放角进行对比，其结果如表 4 所示。由表 4 可知，铺放角的理论值与试验值之间的相对误差均小于 5%，其铺放角理论计算公式正确可信。

表 4 试验结果与理论铺放角对比

Table 4 Comparison of test results and theoretical laying angles

序号 Number	甩麻转速 Rotational speed of hemp throwing /(r · min^{-1})	行车速度 Traveling speed /(km · h^{-1})	试验铺放角 Experimental laying angle /(°)	理论铺放角 Theoretical laying angle /(°)	相对误差 Relative error/%
1	350	6.5	87.5	88.84	1.53
2	325	6.0	90.5	88.93	1.73
3	300	5.5	88.0	89.04	1.18
4	325	7.5	81.0	85.03	4.98
5	325	4.5	89.5	92.75	3.63
6	325	6.0	90.0	88.93	1.19
7	325	6.0	92.0	88.93	3.34
8	250	6.0	80.5	84.24	4.65
9	400	6.0	87.0	91.80	4.32
10	300	6.5	86.5	86.23	0.31
11	325	6.0	90.5	88.93	1.73
12	350	5.5	93.0	91.22	1.91
13	325	6.0	91.0	88.93	2.27

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(A)和行车速度(B)两个试验因素的回归模型,分别如式(22)~(24),铺放角、角度差、根差的方差分析结果见表 5~7。回归方程的 F 值分别为 57.49、33.80、35.63,P 值均小于 0.0001,表明回归模型极显著。失拟项 P 值分别为 0.4518、0.2873、0.5806,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出各因素与响应值的关系并预测最佳铺放结果。

$$y_1 = -269.99327 + 1.26744A + 51.66381B - 0.080000AB - 0.001132A^2 - 2.38486B^2 \quad (22)$$

$$y_2 = 341.29630 - 1.27564A - 41.25670B + 0.060000AB + 0.001319A^2 + 1.96457B^2 \quad (23)$$

$$y_3 = 308.96970 - 1.34222A - 23.27273B - 0.040000AB + 0.002311A^2 + 3.33333B^2 \quad (24)$$

3.3　响应曲面分析

通过 Design-Expert 13 软件绘制出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 6 所示。

图 6a 是甩麻转速和行车速度的交互作用对铺放角影响的响应曲面图,可以看出当甩麻转速一定时,铺放角随着行车速度的增加呈逐渐增加趋势;当行车速度一定时,铺放角随着甩麻转速的增加呈逐渐增加趋势,响应面较陡峭,弯曲程度大,等高线椭圆度较大,同时可以看出甩麻转速较行车速度对铺放角的影响显著。

图 6b 是甩麻转速和行车速度的交互作用对角度差影响的响应曲面图,可以看出随着行车速度和甩麻转速的增加,角度差先降低再升高;行车速度较甩麻转速对角度差的影响显著,从等高线可以看出当行车速度取 6 km · h^{-1}左右,甩麻转速取 330 r · min^{-1}左右时,角度差最小。

图 6c 是甩麻转速和行车速度的交互作用对根差(植株被铺放至地面时,其根部之间的距离,表示铺放的整齐度)影响的响应曲面图,可以看出随着甩麻转速和行车速度的增加,根差呈先降低后增加趋势;行车速度较甩麻转速对根差的影响较为显著;从等高线可以看出当甩麻转速取 330 r · min^{-1},行车速度取 6 km · h^{-1}左右时,根差达到最小值。

表 5　铺放角回归模型方差分析

Table 5　Variance analysis of regression model for laying angle

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	171.10	5	34.22	57.49	<0.0001
A	36.92	1	36.92	62.02	0.0001
B	48.01	1	48.01	80.66	<0.0001
AB	4.00	1	4.00	6.72	0.0358
A^2	60.13	1	60.13	101.02	<0.0001
B^2	42.73	1	42.73	71.78	<0.0001
残差 Residual	4.17	7	0.60		
失拟 Lack of fit	1.87	3	0.62	1.08	0.4518
误差 Error	2.30	4	0.58		
总和 Total	175.27	12			

表 6　角度差回归模型方差分析

Table 6　Variance analysis of regression model for angle difference

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	158.66	5	31.73	33.80	< 0.0001
A	46.55	1	46.55	49.58	0.0002
B	18.18	1	18.18	19.37	0.0032
AB	2.25	1	2.25	2.40	0.1655
A^2	81.70	1	81.70	87.03	< 0.0001
B^2	28.99	1	28.99	30.88	0.0009
残差 Residual	6.57	7	0.94		
失拟 Lack of fit	3.77	3	1.26	1.80	0.2873
误差 Error	2.80	4	0.70		
总和 Total	165.23	12			

表 7　根差回归模型方差分析

Table 7　Variance analysis of regression model for root difference

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	443.50	5	88.70	35.63	<0.0001
A	88.00	1	88.00	35.35	0.0006
B	76.41	1	76.41	30.70	0.0009
AB	1.00	1	1.00	0.40	0.5463
A^2	250.77	1	250.77	100.75	< 0.0001
B^2	83.47	1	83.47	33.53	0.0007
残差 Residual	17.42	7	2.49		
失拟 Lack of fit	6.22	3	2.07	0.74	0.5806
误差 Error	11.20	4	2.80		
总和 Total	460.92	12			

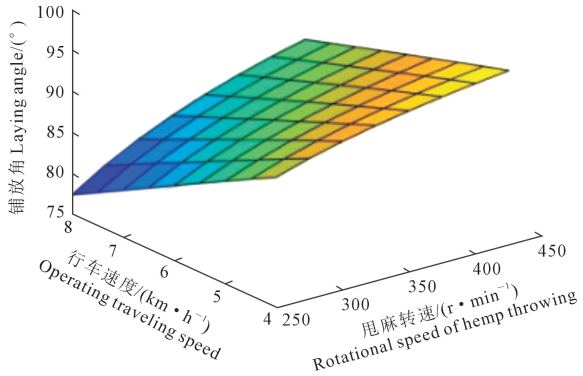

图 5 理论铺放角三维曲面图

Fig.5 Three-dimensional surface plot of theoretical placement angle

3.4 参数组合优化

利用 Design-Expert 13 对二次回归正交试验进行优化分析,优化目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} y_1 = 90° \\ \min_{y_2} \\ \min_{y_3} \\ \text{s.t.} \begin{cases} 250\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1} \leqslant A \leqslant 400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1} \\ 4.5\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1} \leqslant B \leqslant 7.5\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1} \end{cases} \end{cases} \tag{25}$$

软件优化得出最优参数组合为:甩麻转速 306.90 r·min^{-1}、行车速度 5.73 km·h^{-1},此时麻秆铺放角为 89.44°、角度差为 7.66°、根差为 20.47 mm。

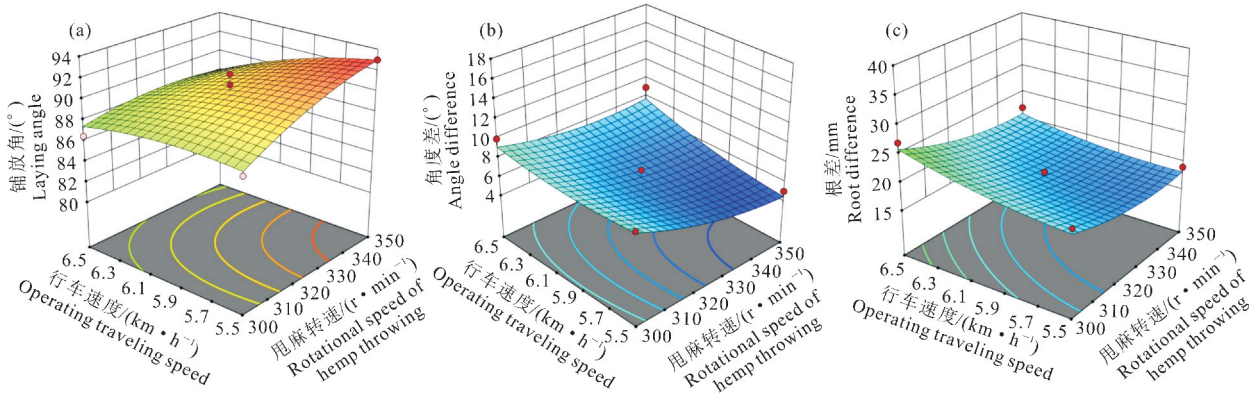

图 6 多因子效应的响应曲面图

Fig.6 Response surface plots of multi-factor effects

3.5 验证试验

为了验证优化结果的正确性,对得出的最优参数组合进行试验,经现场多次调节大麻割铺机甩麻转速为 306 r·min^{-1}和行车速度为 5.7 km·h^{-1}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 6 次,采集数据进行人工处理取平均值,试验结果如表 8 所示。由表 8 可知,铺放角、角度差、根差的理论值与试验值之间的相对误差分别为 0.95%、3.04%、1.49%,均小于 5%,优化结果可靠。

表 8 理论优化与试验验证结果对比

Table 8 Comparison of theoretical optimization and experimental validation results

项目 Item	铺放角度 y_1/(°) Laying angle	角度差 y_2/(°) Angle difference	根差 y_3/mm Root difference
理论值 Theoretical value	89.44	7.66	20.47
试验值 Calculated value	88.60	7.90	20.78
相对误差/% Relative error	0.95	3.04	1.49

4 结 论

1)对工业大麻植株铺放过程进行理论计算分析,得到了铺放角理论公式及植株不向割台倾倒的条件:当行车速度为 3 km·h^{-1}时,理想甩麻速度≥149.59 r·min^{-1}。理论铺放角的 MATLAB 仿真分析得到:甩麻转速一定时,铺放角随行车速度增大而减小,且甩麻转速越低其减小速率越快;行车速度一定时,铺放角随甩麻转速的增大而增大,且行车速度越高其增大速率越快。

2)田间试验得到理论铺放角和试验铺放角的相对误差在 5%置信区间内,验证了修正系数 k=0.9 可信。

3)田间试验得到最佳参数组合为:甩麻转速为 306.90 r·min^{-1},行车速度为 5.73 km·h^{-1},该参数组合下麻秆铺放角、角度差和根差分别为 89.44°、7.66°、20.47 mm。调节大麻割铺机甩麻转速为 306 r·min^{-1}和行车速度为 5.7 km·h^{-1}进行田间试验验证,测得工业大麻铺放角为 88.6°,角度差为 7.9°,根

差为 20.78 mm,其相对误差均小于 5%。田间试验结果表明:铺放角理论公式可信,可为我国工业大麻的机械化收割提供理论参考。

参 考 文 献:

[1] 高佳缘, 刘佳, 房磊, 等. 13 个纤用工业大麻黑龙江第三积温带的比较试验及适应性分析[J]. 中国麻业科学, 2021, 43(1): 21-25.
GAO J Y, LIU J, FANG L, et al. Comparative experiment and adaptability analysis of 13 industrial hemp used in the third cumulative temperatezone of Heilongjiang province [J]. Plant Fiber Sciences in China, 2021, 43(1): 21-25.

[2] 李海同, 吴崇友, 沐森林, 等. 基于 ANSYS-ADAMS 的立式油菜割晒机铺放角形成机理[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 96-105.
LI H T, WU C Y, MU S L, et al. Formation mechanism of laying angle of vertical rape windrower based on ANSYS-ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 96-105.

[3] 舒彩霞, 廖庆喜, 闵光泽, 等. 4WG-1.5 型高秆芦苇收割机的研制[J]. 农业机械学报, 2002, 33(5): 129-130.
SHU C X, LIAO Q X, MIN G Z, et al.Research and development of 4WG-1.5 high-stalk reed harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2002, 33(5): 129-130.

[4] 廖庆喜, 田波平, 李章永, 等. 关于芦苇收割机 Vm 与 N 匹配关系的研究[J]. 粮油加工与食品机械, 1997, (4): 9, 11.
LIAO Q X, Tian B P, Li Z Y, et al. Study on the matching relationship between Vm and N of reed harvesters[J].Cereals and Oils Processing & Food Machinery, 1997, (4): 9, 11.

[5] 景枫, 周学建, 师清翔, 等. 玉米秸秆横向输送装置结构运动参数试验研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 60-64.
JING F, ZHOU X J, SHI Q X, et al.Experimental study on structural and motion parameters of corn straw horizontal conveying device[J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2011, 32(4): 60-64.

[6] 张超波. 黑龙江地区不同汉麻品种的纤维品质和可纺性的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2008.
ZHANG C B.The research of the fiber quality and spinnability of different china-hemp varieties at Heilongjiang area[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2008.

[7] 陈伊文. 立式收割台禾秆铺放角的分析[J]. 农机化研究, 1988, (3): 10-14.
CHEN Y W. Analysis of the straw laying angle of the vertical header [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 1988, (3): 10-14.

[8] 舒彩霞, 曹士川, 廖宜涛, 等. 基于 ADAMS 的油菜割晒机顺向侧铺装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S2): 11-19, 38.
SHU C X, CAO S C, LIAO Y T, et al. Parameter optimization and experiment of forward laying device for rape windrower based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S2): 11-19, 38.

[9] 李志红, 区颖刚. 整秆式甘蔗收获机甘蔗铺放运动学分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 103-108.
LI Z H, OU Y G. Windrowing kinematics analysis of sugarcane on whole stalk sugarcane harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11): 103-108.

[10] 关卓怀, 江涛, 李海同, 等. 倾斜输送式油菜割晒机铺放质量分析与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 59-68.
GUAN Z H, JIANG T, LI H T, et al. Analysis and test of the laying quality of inclined transportation rape windrower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 59-68.

[11] 高巧明, 罗悦洋, 向浩, 等. 丘陵山地模块化甘蔗割铺机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 71-80, 90.
GAO Q M, LUO Y Y, XIANG H, et al. Design and test of modular sugarcane cutting and paving machine in hilly and mountainous area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S2): 71-80, 90.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 收获机械联合收割机试验方法: GB/T 8097-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Equipment for harvesting--combine harvesters-test procedure: GB/T 8097-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农业机械试验条件测定方法的一般规定: GB/T 5262-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Measuring methods for agricultural machinery testing conditions-—General rules: GB/T 5262-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[14] 贺华鹏. 芦苇收割机割台关键部件参数优化研究[D]. 中国农业科学院,北京, 2020.
HE Huapeng . Optimization of cutting-conveying key working parameters of hemp harvester[J]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.

[15] 郝朝会, 吴宗剑, 李元宝, 等. 工业大麻收获机割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(S2): 112-121.
Hao Chaohui, Wu Zongjian, Li Yuanbao, et al. Design and experiment of header for industrial hemp harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2): 112-121.