

圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性 测绘装置设计与试验

林 静,马 铁,陆泽城,李宝筏,宋建鹏,吕秋立
(沈阳农业大学工程学院,辽宁 沈阳 110161)

摘 要:免耕播种机是保护性耕作的关键机具之一,其播种质量的好坏在很大程度上影响着保护性耕作的效果。为了优化免耕播种机的关键部件破茬刀,研制了一种圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测绘装置,该装置能够实现实时地测绘出圆盘破茬刀待测点的运动轨迹。通过对三种圆盘破茬刀的运动轨迹的测绘与试验,得出光面圆盘破茬刀上待测点的运动轨迹为光滑的摆线,半圆型缺口盘和阿基米德螺线盘上待测点的运动轨迹为由不同长度的圆弧组成的云曲线。在此基础上对三种圆盘破茬刀冲击情况、入土滑切角和滑切速度变化进行了分析比较,建立了阿基米德螺线型圆盘破茬刀切割根茬运动的运动学模型。描绘出阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的运动轨迹是由不同长度的圆弧组成的云曲线,建立了阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的运动方程。发现阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的轨迹具备了光面圆盘破茬刀的摆线规律,也具备了半圆型缺口圆盘破茬刀的冲击性,并且滑切角较大,滑切性能更好。通过圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测绘装置的两因素三水平正交试验分析,得出阿基米德螺线型圆盘破茬刀、机具配重为 100 kg 时破茬效果达 90% 以上,破茬率较高。

关键词:免耕播种机;圆盘破茬刀;云曲线;测绘装置;运动轨迹
中图分类号:S223.2 **文献标志码:**A

Design and experiment of the surveying and mapping device for the movement characteristics of corn stubble cutting with disc cutting knife

LIN Jing, MA Tie, LU Ze-cheng, LI Bao-fa, SONG Jian-peng, LV Qiu-li
(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: No-till planter is one of the key equipment of conservation tillage, the seeding quality greatly affect the development of conservation tillage. In order to optimize key components of no-till planter, we developed a disc stubble knife cutting corn rootstalk motion characteristics testing device. The device can realize real-time mapping of disc coulter work when measured point trajectories. Through the mapping and test on the three kinds of disc stubble knife trajectory, inferred that the movement track of smooth disc broken stubble knife's stay measuring points was smooth cycloid, the movement track of semicircular type gap disc and Archimedes spiral disc's stay measuring points was cloud curves by different length of arc. Based on the above mention, make the kinematic analysis on three disc cutting knives, impact situation, buried slip angle and cutting speed changes were respectively analyzed and compared. To establish a stubble breaking cutter cutting stubble movement kinematics model with Archimedes spiral disc type. Depict the Archimedes spiral disc broken stubble blade mouth point trajectory was composed of different length of the are cloud curve and to establish a broken stubble blade mouth point equations of motion with Archimedes spiral disc type. Found the track of the knife-edge points on linear Archimedes screw disc stubble has the cycloidal law on the smooth disc stubble knife, but also has the impact on the semi-circular notch disc stubble knife, and the sliding cutting angle bigger, sliding cut performance better. Through the disc break stubble cutter cutting corn root stubble motion characteristics testing device of 2 factors 3 levels orthogonal test analysis, that Archimedes spiral disc type stubble breaking cutter, machine counterweight to 100 kg breaking stubble is best, stubble breaking rate is high.

Keywords: no-till Planter; disc cutting knife; cloud curve; test device; motion track

收稿日期:2016-06-02 修回日期:2016-09-21
基金项目:公益性行业(农业)科研专项“旱地合理耕层构建技术指标研究”(201503116);国家自然科学基金资助项目“机械免耕播种切
拔防堵装置的工作机理与参数优化研究”(51275318)
作者简介:林 静(1967—),女,教授,博士生导师,主要从事旱作农业机械化及智能化装备研究。E-mail:synydxlj69@163.com。

免耕播种机是保护性耕作机具研发的重点和难点。当作业环境差,土壤坚硬且垄形不整时,易造成免耕播种机壅堵、播种深度不易把握,机器走不直、易跑偏、垄埂土易向垄沟滑落等问题^[1-2]。因此,免耕播种机应具有良好的破茬防堵能力,避免秸秆和作物残茬对播种机造成堵塞,保证开沟器的入土能力,能在未耕地上开出有利于种子发芽生长的种沟,并且减少动土量和耕作阻力,以满足播深均匀度的要求,提高种子的出苗率^[3-15]。

常用的免耕播种机的破茬装置有圆盘刀式、旋耕刀式、尖角式等。短翼尖角破茬铲结构简单,破茬效果好,阻力小,对土壤的搅动相对较小。带状旋耕刀由直刀和弯刀组合,直刀用于切断开沟器前方的横茬,弯刀用于切断立茬。带状旋耕刀的破茬性能最好,但结构比较复杂,动力消耗大。圆盘刀破茬是国际应用较多的破茬技术,其原理是圆盘刀随播种机行进在地面滚动,利用刃口将秸秆、根茬和土壤切开,形成种沟,但需要较大的正压力才能保证一定的入土深度和较好的破茬效果。为了减小东北玉米免耕播种机的破茬阻力,提高破茬质量,课题组研制了新型阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀。同时,为了研究其运动特性,研制了一种圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测绘装置,通过该装置能够实现实时精确地测绘出圆盘破茬刀工作时待测点的运动轨迹,为阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀优化结果的验证提供技术支撑^[16-27]。

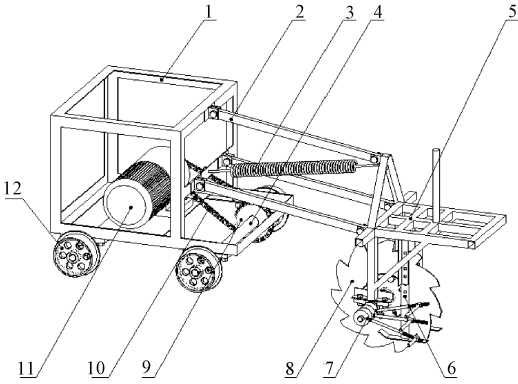
1 测绘装置的总体结构与工作原理

1.1 测绘装置的总体结构

圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测绘装置总体结构,如图 1 所示。该装置由小车机架、测绘机构和传动系统三大部分组成。传动系统安装于小车机架上为整个装置提供动力,测绘机构与机架通过三根连杆形成的简易平行四连杆仿形机构连接。整个测试机构由电动机提供动力,通过传动系统使小车前进,带动待测破茬盘运作,测绘探针即时在图纸上测绘出待测点的运动轨迹^[28-30]。

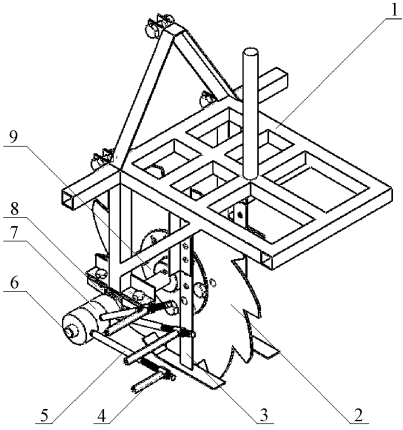
1.2 测绘装置的工作原理

测绘装置是圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测绘装置最关键的部件,是整个测绘装置的核心。测绘装置主要由测绘探针、测绘支杆、破茬盘接盘、待测破茬盘、测绘和配重支架、限深板、测绘传动轴等组成,如图 2 所示。测绘时,待测破茬盘与测绘传动轴通过破茬盘接盘连接固定,破茬盘与接盘用螺栓连接,接盘与传动轴键连接,从而使破茬盘与传动



1. 小车架;2. 连杆;3. 弹簧;4. 小车滚动轴;5. 测绘和配重支架;6. 限深板;7. 测绘装置;8. 待测圆盘破茬刀;9. 传动链轮;10. 传动链条;11. 减速电机;12. 小车轮
1. Trolley frame; 2. Connecting rod; 3. Spring; 4. Axis of rolling of trolley; 5. Mapping and balance weight holder; 6. Depth control shoe; 7. Mapping device; 8. Disc breaking knife to be measured; 9. Drive sprocket; 10. Driving chain; 11. Gear motor; 12. Trolley wheel

图 1 圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测绘装置总体结构
Fig.1 Device for the movement characteristics of corn stubble cutting with disc cutting knife



1. 测绘和配重支架;2. 待测破茬盘;3. 限深板;4. 测绘探针;5. 测绘支杆;6. 测绘传动轴;7. 测绘轴套;8. 轴承座及轴承;9. 破茬盘接盘
1. Mapping and balance weight holder; 2. Pieces plate to be measured; 3. Depth control shoe; 4. Probe of surveying and mapping; 5. Surveying and mapping support arm; 6. Surveying and mapping axle; 7. Shaft sleeve of surveying and mapping; 8. Bearing block and bearing; 9. Disk mounting of pieces plate

图 2 测绘装置

Fig.2 Surveying and mapping device

轴实现刚性连接。测绘轴套、测绘支杆和测绘探针组成一个测绘单体,用于测绘对应待测点的运动轨迹。它们分别通过 M10 的螺纹连接,测绘探针半径由此可调至与对应待测点半径一致,测绘探针与支杆由螺丝顶针固定。如图 3(a)所示,测绘单体由测绘轴套套住传动轴后转动若干角度直至与待测点对

应,并将测绘支杆一端顶在传动轴对应沟槽内,使测绘单体与传动轴连接。以此使测绘单体与破茬盘上对应待测点同步运动,完成整个测绘系统。此测绘装置上有 3 个测绘单体,以 a (红)、 b (蓝)、 c (黑) 3 个为待测点关键点。 a 点是刀口的底端,极径等于破茬刀的最小半径 $R_{\min}$; b 点是极角 δ 等于该刀口的包角 Φ 的一半时,极径 R 与刀口曲线的交点; c 点是刀口的顶端,极径等于破茬刀的最大半径 $R_{\max}$ 。测绘装置工作时可同时测出 3 个待测点的运动轨迹。且 3 个测绘的顶端同时顶住左边土槽壁上的图纸上,便描绘出 3 个关键点的运动轨迹。

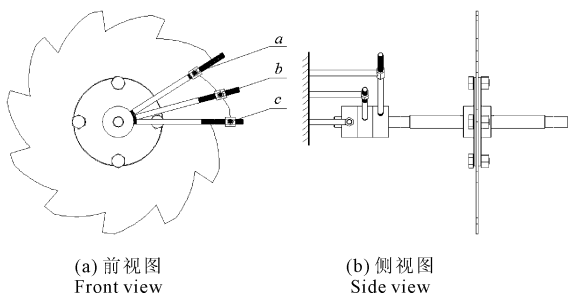


图 3 阿基米德螺旋型圆盘破茬刀待测点的确定

Fig.3 To determine archimedes spiral disc stubble breaking cutter point to be tested

测绘装置工作时,传动轴带动破茬盘转动和向前移动,同时带动测绘探针与破茬盘同步运动,将待测点的对应运动轨迹测绘出来。破茬盘切割玉米根茬时,测绘装置就会将其上三个待测点的运动轨迹描绘在土槽壁上的测绘图纸上,完成运动轨迹的测绘。

圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测绘装置为

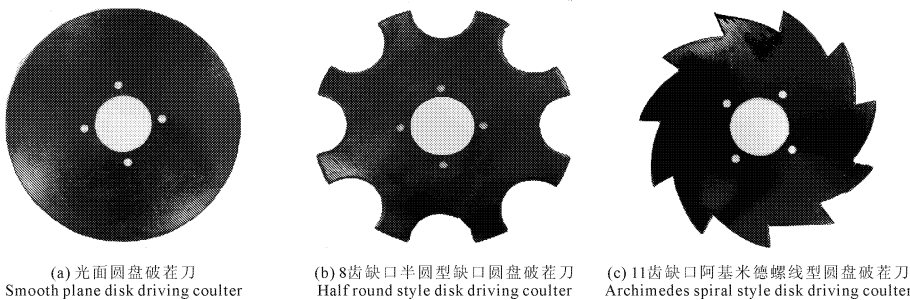


图 4 三种类型的圆盘破茬刀

Fig.4 Three types of disc cutting knife

经过测绘装置的测绘,得出三种圆盘破茬刀特测点的运动轨迹曲线(图 5)。光面圆盘破茬刀刀口待测点的运动轨迹形成的曲线是摆线,单个周期内不会产生冲击。半圆型缺口圆盘破茬刀和阿基米德螺旋线型圆盘破茬刀刀口待测点的运动轨迹是由不同长度圆弧组成的云曲线,当待测点结束一段圆弧进

室内试验装置,小车由电动机驱动,待测破茬盘切割玉米根茬的同时将破茬盘上若干待测点的运动轨迹绘制出来,完成测绘。将测绘装置小车置于试验土槽上,由电动机提供动力,通过减速器和传动系统带动小车沿土槽壁以一定速度前进。通过连杆连接测绘装置和待测破茬盘,使破茬盘在土槽内运动,切割玉米根茬。同时测绘装置将破茬盘上的若干待测点的运动轨迹绘制出来。

2 圆盘破茬刀切割根茬的运动学分析

2.1 圆盘破茬刀切割根茬的原理

破茬刀是免耕播种机破茬防堵装置的重要工作部件之一,其性能的好坏直接影响了破茬效果。圆盘破茬刀刀口曲线形状应满足:① 具有一定的冲击性能,滑切角能随着切茬的过程逐渐变化;② 破茬刀在切断根茬时应具备良好的滑切性。所谓滑切,是指被切根茬沿破茬刀刀口曲线的切向有滑移运动的切削过程;产生滑移效果的条件是滑切角大于刀口曲线与被切根茬之间的摩擦角。工作中,圆盘破茬刀受摩擦力被迫随机具滚动前进,并借助免耕播种机的自重及配重切开玉米根茬。在此过程中,不同的破茬刀刀口曲线形状将直接影响破茬效果。

2.2 三种圆盘破茬刀破茬运动轨迹的测绘试验

对三种圆盘破茬刀,即光面圆盘破茬刀、8 齿缺口半圆型缺口圆盘破茬刀、11 齿缺口阿基米德螺旋线型圆盘破茬刀(图 4)进行运动特性测绘,得出三种圆盘破茬刀刀口关键点运动轨迹曲线形状^[31-38],如图 5 所示。

入下一段圆弧时,都会产生 1 次冲击。一个周期内产生的冲击次数与破茬刀的缺口数或刀口数相等。

从图 5 三种圆盘破茬刀旋转一周时的运动轨迹曲线得出,光面圆盘破茬刀切割平稳;而半圆缺口圆盘破茬刀在旋转一周时,对地面产生了 8 次振动;阿基米德螺旋线型圆盘破茬刀对地面产生了 11 次振动。

当遇到根茬时,每振动 1 次即振动的刀具切割根茬 1 次。当运动朝向为机具前进方向的圆弧位置时,进入下一段圆弧的运动轨迹。这一过程产生的惯性冲击使破茬刀获得更大的冲击力,提升了切断根茬的效果并且减少了破茬阻力。

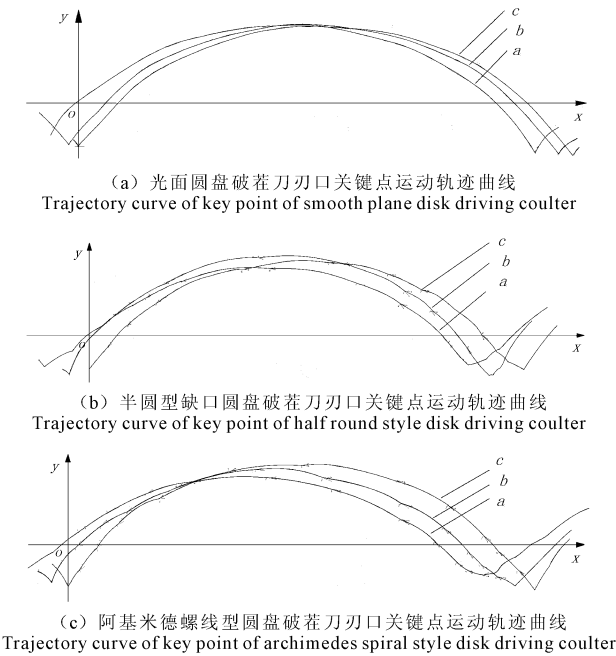


图 5 三种圆盘破茬刀刀口关键点运动轨迹曲线
Fig.5 The movement trajectory curve shape of the key points of the cutting edge of three kinds of disc stubble knife

2.3 破茬刀滑切角分析

玉米根茬由表皮、皮层和中柱三个部分构成^[39-40]。表皮的最外层是根毛区,由表皮的根毛和数层皮下薄壁细胞组成;表皮下为皮层;中柱层包括韧皮部、木质部和髓,与中柱鞘相连的原生韧皮细胞是筛管,随后分化出后生韧皮部,是由若干个筛管和伴壁细胞组成。根的中心是髓,大部分由薄壁细胞组成。圆盘破茬刀刀口作用于玉米根茬的切断方式有两种,砍切和滑切。砍切时,刀口施向秸秆的力,首先要克服刀刃接触的表皮组织的剪切应力,同时还必须克服秸秆表皮下的内部组织的剪切应力,方能切开从而切断玉米根茬和秸秆。同时,砍切时刀片产生的冲击力大,由此引起的机具振动较大;滑切中所需要的力小于砍切中所需要的力。在滑切中,只需要克服表皮接触部位的剪应力,就可切开表皮部分,从而一层层地将秸秆切开直至切断。如图 6 所示,根茬对刀口的阻力 F ,可分解为平行和垂直刀口的两个分力 F_1 和 F_2 。 F_1 使根茬沿刀口滑动, F_2 使刀口切入根茬中。此外,刀口处还有阻止茬子

滑动的摩擦力 f 。

$$f = F_2 \times \mu = F \times \cos\theta \times \operatorname{tg}\varphi \tag{1}$$

式中, μ 为根茬对刃口的摩擦系数; θ 为滑切角($^\circ$); φ 为摩擦角($^\circ$)。

当圆盘破茬刀切割玉米根茬时,靠玉米根须与土壤盘结形成一点支承的切割条件。要破切地面以上玉米根茬根上节和地面以下根下节,要依靠圆盘破茬刀本身的惯性、根茬的硬度及土壤强度来维持其切割性能。因此刀片在工作时不仅要有较高的水平线速度,同时其正切面的滑切角必须符合稳定切割的条件。

根据破茬刀切割根茬原理,破茬刀应具备良好的滑切性且滑切角能随着切茬的过程逐渐变化。滑切角分静态滑切角和动态滑切角,本文研究动态滑切角 θ ,即破茬刀刀口上任一点的绝对速度方向与该点的法线所夹的角。 θ 角大于摩擦角 φ 时,刀口即有滑切作用。 θ 角越大,滑切越明显。

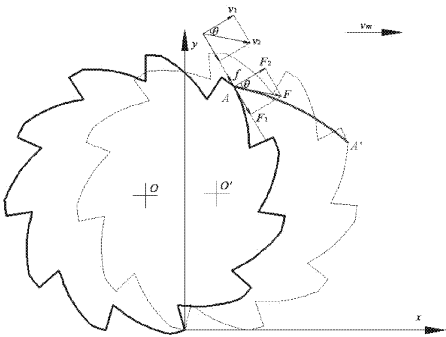


图 6 破茬刀滑切角分析
Fig.6 Analysis of sliding cutting angle of stubble cutting knife

破茬刀切割根茬时,以水平速度 v_m 向前滚动,中心从 O 点运动到 O' 点,刀口 A 点运动到 A' 点,曲线 AA' 即为刀口 A 点的运动轨迹。滑切角是 A 点的绝对运动方向与其所在刀口法线的夹角(图 6)。为了研究破茬刀切割玉米根茬的运动特性,分别制作了三种圆盘破茬刀的模型,比例 1:1,如图 7 所示。

三种圆盘破茬刀关键点切割玉米根茬时的运动轨迹为云曲线,如图 8 所示。图 8 中红、蓝、黑线分别对应圆盘破茬刀模型上的关键点 a (红)、 b (蓝)、 c (黑),图中虚线为相邻刀口上三点的轨迹曲线。圆盘破茬刀作业时的入土深度为 7 cm,在深度 0.5 ~ 6.5 cm 之间按入土深度每隔 1 cm 分别测量各盘上 a (红)、 b (蓝)、 c (黑)待测点的滑切角 θ ,测绘结果如表 1 所示,得出玉米根茬的内表面摩擦角为 31.96° 。

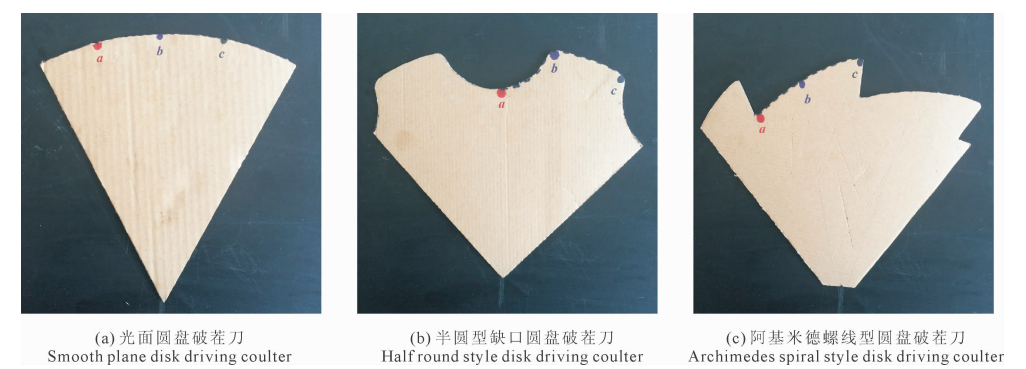


图 7 圆盘破茬刀模型
Fig.7 Disc cutting knife models

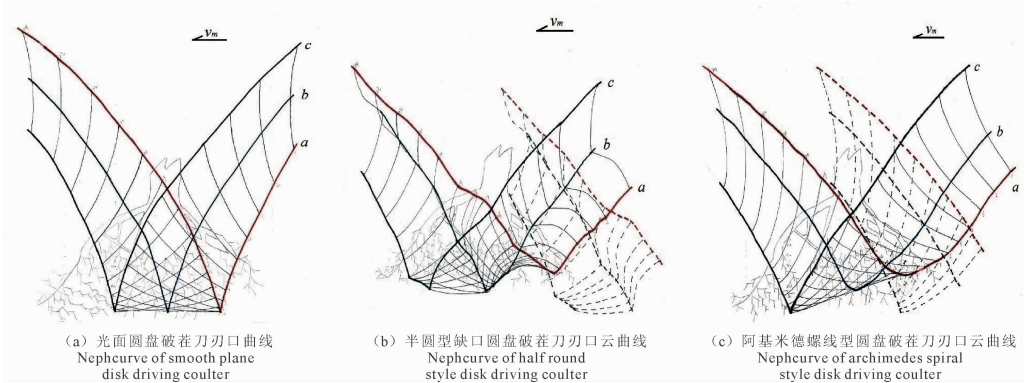


图 8 圆盘破茬刀刃口曲线图形分析
Fig.8 Analysis of the curve and figure of cutting edge of disc stubble knife

表 1 圆盘破茬刀滑切角
Table 1 Disc cutting blade sliding cutting angle

入土深度/cm Soil depth	光面圆盘破茬刀 Smooth plane disk driving coulter			半圆型缺口圆盘破茬刀 Half round style disk driving coulter			阿基米德螺线型圆盘破茬刀 Archimedes spiral style disk driving coulter		
	c	b	a	c	b	a	c	b	a
0.5	27	28	23	21	41	18	9	31	21
1.5	24	24	22	16	46	16	11	40	38
2.5	22	21	21	13	53	13	13	51	59
3.5	19	18	19	14	65	—	17	57	81
4.5	16	14	18	13	74	—	26	82	—
5.5	14	11	17	12	78	—	42	—	—
6.5	12	10	15	11	—	—	51	—	—

根据表 1 分析得各圆盘破茬刀刃口滑切角变化关系曲线(图 9)。光面圆盘破茬刀刃口上 a(红)、b(蓝)、c(黑)三点的滑切角均小于摩擦角 φ ,其滑切作用是滑移导致的,滑切效果不好,破茬阻力大。半圆型缺口和阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上 a(红)、b(蓝)、c(黑)三点的滑切角均有一部分大于摩擦角 φ ,产生滑切。入土部分是刃口切割根茬的部分,是重点研究的部分,且主要切割根茬的深度在 1.5~6.5 cm 之间(图 9)。半圆型缺口圆盘破茬刀刃口上 b 点的滑切角逐渐增大,但 a、c 两点的滑切角逐渐减小,滑切性降低;阿基米德螺线型圆盘破茬

刀刃口上 a、b、c 三点的滑切角均迅速增大,滑切性快速提升。综合分析得出阿基米德螺线型圆盘破茬刀的滑切性能最佳。

2.4 滑切速度变化分析

测绘装置以一定速度 v_m 水平向左行驶,分别测量各盘上 a、b、c 相邻待测点的距离,通过距离变化可算出各待测点的速度变化。经分析换算后,得出以 $1.38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度沿水平方向前进时的各待测点的速度变化。试验结果如表 2 所示。

根据表 2 分析得各圆盘破茬刀刃口滑切速度变化关系(图 10)。各圆盘破茬刀刃口所在位置越高,

其速度越大;随着刃口降低,速度也随之降低,此时 $v_c > v_b > v_a$ 。当刃口降至最低点后逐渐升高,速度也随之增大,但此时 $v_a > v_b > v_c$ 。8~15 cm 位置是切割根茬的关键位置,对比发现阿基米德螺旋型圆盘破茬刀在 8~15 cm 位置的速度比另两种圆盘破茬刀的速度大,提高了切茬效率。

2.5 切割加速度变化分析

玉米根茬,一般距地面高 10~25 cm,靠作物根须与土壤盘结形成一点支撑的切割条件。粉碎地面以上茬子和地面以下根须,需依靠茬子本身的惯性、茬子的刚度及土壤强度来维持其切割性能。因此刀片在工作时不仅要有较高的水平线速度,同时其正切面的切削角必须符合稳定切割的条件。刀片正切面加速度是速度变化量与发生这一变化所用时间的比值,即切割加速度 $a(\Delta v/\Delta t)$,由此可得:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, a 为加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); Δv 为速度变化量($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); Δt 为发生 Δv 所需要的时间(s); v_i 为第 i 个位置的速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_{i+1} 为第 $i + 1$ 个位置的速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

将表 2 中的数据代入式(2)中,可得表 3 圆盘破茬刀刃口切割加速度变化。

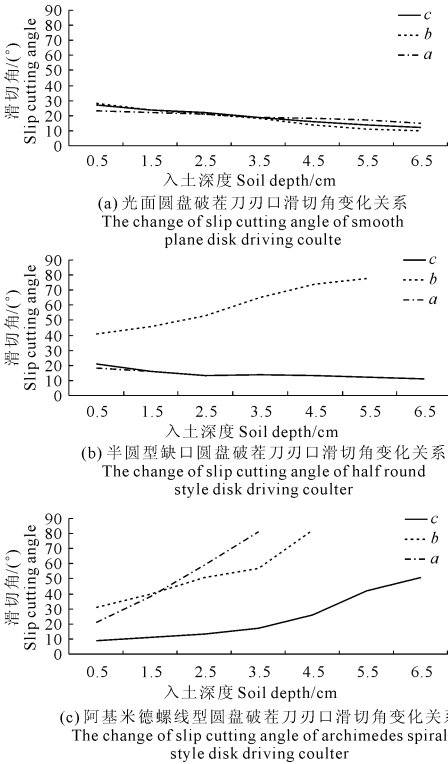


图 9 各圆盘破茬刀刃口滑切角变化关系
Fig. 9 The change of the sliding angle of the cutting edge of each disc stubble knife

表 2 圆盘破茬刀刃口滑切速度变化
Table 2 Sliding speed changing of cutting edge of disc stubble knife

序号 Serial number	位置 Position	光面圆盘破茬刀 Smooth plane disk driving coulter			半圆型缺口圆盘破茬刀 Half round style disk driving coulter			阿基米德螺旋型圆盘破茬刀 Archimedes spiral style disk driving coulter		
		c	b	a	c	b	a	c	b	a
1	1-2	2.300	2.024	1.840	2.760	2.300	1.840	1.794	1.472	1.196
2	2-3	2.116	1.840	1.564	1.610	1.288	0.920	1.748	1.334	1.058
3	3-4	1.840	1.518	1.196	1.472	1.196	1.104	1.656	1.288	1.012
4	4-5	1.702	1.426	1.104	1.518	1.196	0.920	1.518	1.104	0.828
5	5-6	1.334	1.104	0.828	1.150	0.874	0.598	1.334	0.966	0.690
6	6-7	1.334	1.012	0.690	0.874	0.598	0.368	1.288	0.828	0.644
7	7-8	1.196	0.874	0.460	0.828	0.460	0.368	1.058	0.736	0.644
8	8-9	1.012	0.690	0.322	0.644	0.230	0.368	1.012	0.644	0.506
9	9-10	0.782	0.460	0.138	0.460	0.184	0.276	0.828	0.506	0.414
10	10-11	0.690	0.276	0.092	0.460	0.184	0.184	0.690	0.368	0.414
11	11-12	0.414	0.092	0.230	0.460	0.138	0.230	0.598	0.460	0.368
12	12-13	0.230	0.092	0.460	0.506	0.092	0.368	0.414	0.322	0.506
13	13-14	0.092	0.230	0.506	0.552	0.230	0.506	0.276	0.276	0.598
14	14-15	0.092	0.414	0.736	0.368	0.552	0.736	0.138	0.368	0.644
15	15-16	0.276	0.598	0.920	0.230	0.598	0.828	0.138	0.506	0.782
16	16-17	0.414	0.736	1.058	0.230	0.644	1.012	0.322	0.690	0.920
17	17-18	0.690	1.058	1.288	0.276	0.644	1.058	0.460	0.828	1.058
18	18-19	0.828	1.150	1.426	0.276	0.644	1.150	0.598	1.012	1.196
19	19-20	1.012	1.242	1.564	0.874	1.380	1.564	0.736	1.104	1.288
20	20-21	1.196	1.472	1.702	1.058	1.426	1.610	0.874	1.196	1.426
21	21-22	1.426	1.656	2.024	0.966	1.564	1.656	1.058	1.334	1.518
22	22-23	1.702	1.932	2.070	1.104	1.564	1.702	1.104	1.472	1.610
23	23-24	1.656	1.978	2.116	1.380	1.610	1.748	1.334	1.610	1.794

表 3 圆盘破茬刀刃口切割加速度变化

Table 3 Accelerated speed variation of cutting edge of each disc stubble knife

序号 Serial number	光面圆盘破茬刀 Smooth plane disk driving coultter			半圆型缺口圆盘破茬刀 Half round style disk driving coultter			阿基米德螺旋型圆盘破茬刀 Archimedes spiral style disk driving coultter		
	c	b	a	c	b	a	c	b	a
1	- 8.46	- 8.46	- 12.70	- 52.90	- 46.55	- 42.32	- 2.12	- 6.35	- 6.35
2	- 12.70	- 14.81	- 16.93	- 6.35	- 4.23	8.46	- 4.23	- 2.12	- 2.12
3	- 6.35	- 4.23	- 4.23	2.12	0.00	- 8.46	- 6.35	- 8.46	- 8.46
4	- 16.93	- 14.81	- 12.70	- 16.93	- 14.81	- 14.81	- 8.46	- 6.35	- 6.35
5	0.00	- 4.23	- 6.35	- 12.70	- 12.70	- 10.58	- 2.12	- 6.35	- 2.12
6	- 6.35	- 6.35	- 10.58	- 2.12	- 6.35	0.00	- 10.58	- 4.23	0.00
7	- 8.46	- 8.46	- 6.35	- 8.46	- 10.58	0.00	- 2.12	- 4.23	- 6.35
8	- 10.58	- 10.58	- 8.46	- 8.46	- 2.12	- 4.23	- 8.46	- 6.35	- 4.23
9	- 4.23	- 8.46	- 2.12	0.00	0.00	- 4.23	- 6.35	- 6.35	0.00
10	- 12.70	- 8.46	6.35	0.00	- 2.12	2.12	- 4.23	4.23	- 2.12
11	- 8.46	0.00	10.58	2.12	- 2.12	6.35	- 8.46	- 6.35	6.35
12	- 6.35	6.35	2.12	2.12	6.35	6.35	- 6.35	- 2.12	4.23
13	0.00	8.46	10.58	- 8.46	14.81	10.58	- 6.35	4.23	2.12
14	8.46	8.46	8.46	- 6.35	2.12	4.23	0.00	6.35	6.35
15	6.35	6.35	6.35	0.00	2.12	8.46	8.46	8.46	6.35
16	12.70	14.81	10.58	2.12	0.00	2.12	6.35	6.35	6.35
17	6.35	4.23	6.35	0.00	0.00	4.23	6.35	8.46	6.35
18	8.46	4.23	6.35	27.51	33.86	19.04	6.35	4.23	4.23
19	8.46	10.58	6.35	8.46	2.12	2.12	6.35	4.23	6.35
20	10.58	8.46	14.81	- 4.23	6.35	2.12	8.46	6.35	4.23
21	12.70	12.70	2.12	6.35	0.00	2.12	2.12	6.35	4.23
22	- 2.12	2.12	2.12	12.70	2.12	2.12	10.58	6.35	8.46

根据表 3 分析得出各圆盘破茬刀刃口切割加速度变化关系(图 11)。

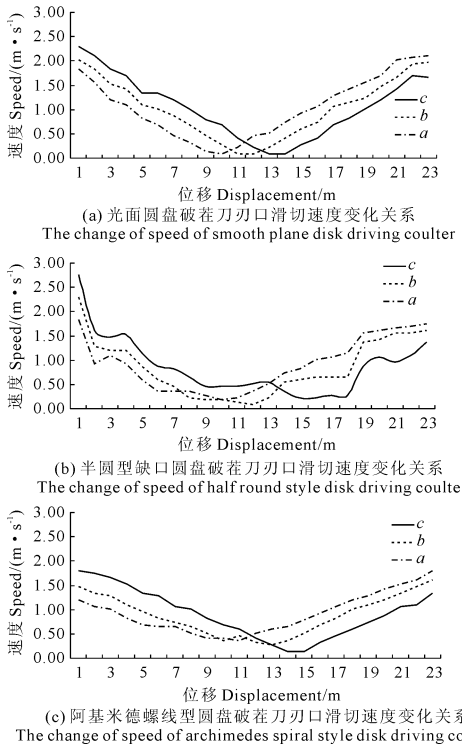


图 10 各圆盘破茬刀刃口滑切速度变化关系
Fig.10 The change of sliding cutting speed of cutting edge of each disc stubble knife

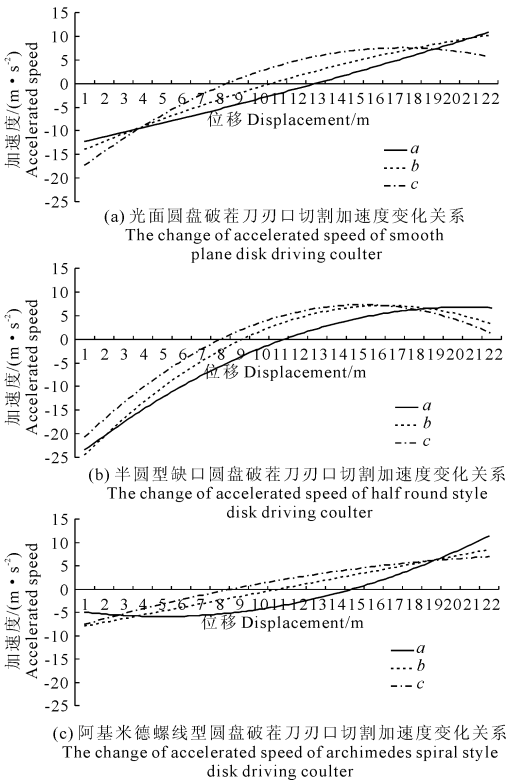


图 11 各圆盘破茬刀刃口切割加速度变化关系
Fig.11 The acceleration variation of cutting edge of each disc Stubble Knife

3 阿基米德螺线型圆盘破茬刀切割根茬运动的运动学模型

3.1 圆盘破茬刀刃口上关键点的运动轨迹

阿基米德螺线型圆盘破茬刀的工作性能优于光面圆盘破茬刀和半圆型缺口圆盘破茬刀。根据试验结果得出阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的运动轨迹,并建立其运动方程,并进行仿真模拟对比。如图 12 所示,阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的运动轨迹是由不同长度的圆弧组成的曲线,每个关键点在结束一段圆弧的运动进入下一段圆弧时,

方向都会发生改变,就会产生冲击。当点运动到最高点前上升时,每次冲击都会有一次上升的过程,所产生的惯性可以甩出破茬刀带出的土壤和残茬,减少带土和缠绕,防止堵塞。当点运动越过最高点开始下降时,每次冲击又都会对破茬刀产生一定的推进,产生更大的冲击力,减少破茬阻力,顺利破茬,完成入土→滑切→切断根茬→出土的工艺过程。此外,每个关键运动点每一个工作周期内运动曲线是摆线,而不是余摆线。因此,阿基米德螺线型圆盘破茬刀在入土、切茬、出土的过程中能够减少扣土、带土现象的发生,减少对土壤的扰动。

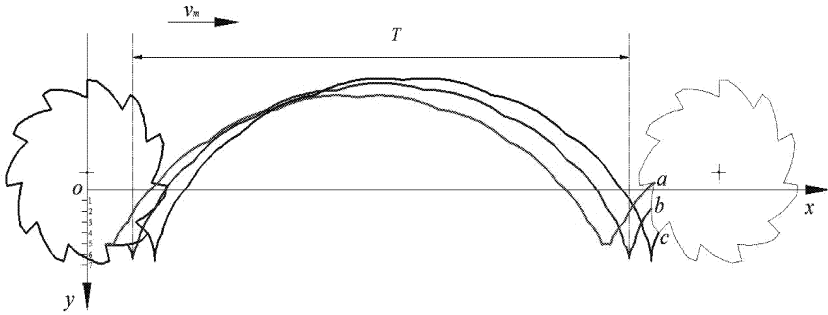


图 12 阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的运动轨迹

Fig.12 The trajectory of the points on the archimedes spiral disc's cutting blade

3.2 阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的运动方程

根据已知的阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的运动轨迹(图 13),在绝对坐标系 xOy 下,得出刃口曲线上任意一点的运动方程为^[41-43]:

$$\begin{cases} x = L_{Z-n+1}\cos\varphi + 2nR_{\max}\sin\left(\frac{180}{Z}\right)^\circ \\ y = L_{Z-n+1}\sin\varphi + R_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\epsilon_n + 180^\circ \leq \varphi \leq \epsilon_n + 180^\circ + \left(\frac{360}{Z}\right)^\circ$

已知阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口数 $Z = 11$, $R_{\max} = 215 \text{ mm}$,代入式(3),得:

$$\begin{cases} x = L_{11-n+1}\cos\varphi + 2 \times 215n\sin\left(\frac{180}{11}\right)^\circ \\ y = L_{11-n+1}\sin\varphi + 215 \end{cases}$$

即:

$$\begin{cases} x = L_{12-n}\cos\varphi + 430n\sin 16.36^\circ \\ y = L_{12-n}\sin\varphi + 215 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\epsilon_n + 180^\circ \leq \varphi \leq \epsilon_n + 180^\circ + \left(\frac{360}{Z}\right)^\circ$

综上,式(4)即为该阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上任意一点的运动方程。

3.3 阿基米德螺线型圆盘破茬刀同一刃口上不同点的运动情况

分析同一刃口上不同点的运动情况。如图 14 所示,任意选择一个刃口,关键位置点 a、b、c。c 点是刃口的顶端,极径等于破茬刀的最大半径 $R_{\max}$;b 点是极角 δ 等于该刃口的包角 Φ 的一半时,极径 R 与刃口曲线的交点;a 点是刃口的底端,极径等于破茬刀的最小半径 $R_{\min}$ 。

从图 14 可以得出,阿基米德螺线型圆盘破茬刀逆时针转动,随机具从右向左前进,待测刃口转动到切茬位置时,a、b、c 三点依次切茬,刃口曲线上的点按极径大小,从小到大顺次切茬,避免了漏切的问题。

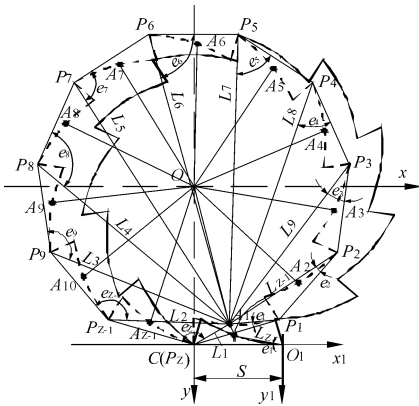


图 13 阿基米德螺线型圆盘破茬刀刃口上点的初始角

Fig.13 Archimedean spiral disc cutting blade points on the initial angle

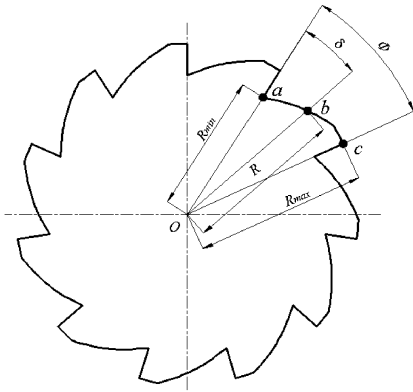


图 14 阿基米德螺线型圆盘破茬刀刀口上点的定位
Fig. 14 Archimedes spiral disc stubble on the blade point positioned

综上所述,阿基米德螺线型圆盘破茬刀作业时,具备以下优势:刀口的运动轨迹有与光面圆盘破茬刀类似的摆线,减少了对土壤的扰动;具备了半圆型缺口圆盘破茬刀的冲击性能,提高了破茬效果;具有良好的滑切性能且避免了破茬刀漏切的问题。

4 试验验证

4.1 试验条件与试验设备

试验土槽中土壤各项指标接近田间土壤各项指标。玉米根茬于试验开始前 2 个月从沈阳农业大学玉米试验田中移栽过来。移栽后对土槽中土壤进行平整,浇水等处理,尽可能模拟田间工况。对移栽后的根茬进行测量得出,根茬平均高度为 174 mm,根茬平均直径为 34 mm,根茬间距为 30 cm。试验设备包括如图 4 所示的三种圆盘破茬刀,分别是光面圆盘破茬刀、半圆型缺口圆盘破茬刀和阿基米德螺线型圆盘破茬刀。它们的最大直径 D 为 430 mm,厚度 h 为 4 mm。

4.2 试验方法

试验时分别改变一种因素,其它因素不变,来找出该因素对圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性的影响。第一组试验固定机具配重 40 kg 不变,分别使用光面圆盘破茬刀、半圆型缺口圆盘破茬刀和阿基米德螺线型圆盘破茬刀。第二组试验固定圆盘破茬刀(阿基米德螺线型圆盘破茬刀),采用不同机具配重,分别为 40 kg、70 kg 和 100 kg。试验在准备好的土槽内进行切茬试验,打开电动机,使试验装置通电开始工作,待测破茬盘在运动的同时由测绘探针测绘出运动轨迹,记录试验数据。通过两组试验,得出圆盘破茬刀类型和配重对破茬盘运动轨迹的影响。圆盘破茬刀类型决定了运动轨迹的形状和类型,即

光面圆盘破茬刀上待测点的运动轨迹为光滑的摆线,半圆型缺口盘和阿基米德螺线盘上待测点的运动轨迹为不同长度的圆弧组成的云曲线,每个周期的圆弧个数由破茬盘上的缺口数决定。配重保证了破茬效果,对破茬率影响较大;并且能够影响运动轨迹的垂直位置,即切茬深度。配重过轻无法顺利破茬,整条轨迹线上移,切茬深度无法保持;配重过大虽然可以顺利破茬但是增加了功耗,影响了工作效率。采用两因素三水平的正交试验,试验因素与水平如表 4 所示,试验指标为破茬率。

表 4 正交试验的因素与水平
Table 4 Factors and levels of orthogonal test

水平 Level	因素 Factor	
	圆盘破茬刀类型 A Disk driving coulter style	机具配重 B Machine bob-weight/kg
1	光面圆盘破茬刀 X1 Smooth plane disk driving coulter	40
2	半圆型缺口圆盘破茬刀 X2 Half round style disk driving coulter	70
3	阿基米德螺线型圆盘破茬刀 X3 Archimedes spiral style disk driving coulter	100

4.3 试验结果分析

根据正交试验 $L_9(3^4)$ 正交表来安排试验。如表 5 所示,将圆盘破茬刀类型记为 A,机具的配重记为 B,并把它们安排在正交表的前两列,第三、四列作为两个因素的交互作用和误差,需进行 9 次试验。

从表 5 数值分析得出,因素 A 的极差为 6.40,大于因素 B 的极差 1.54,说明圆盘破茬刀类型对破茬率的影响比配重大。以此验证,圆盘破茬刀类型对试验指标影响更显著。根据试验指标的均值 k_i ,可以绘制出试验指标随圆盘破茬刀类型和配重在不同水平的趋势图(图 15)。图 15 中可以看出,随着圆盘破茬刀类型的改变和配重的增加,破茬率均上升,但圆盘破茬刀类型改变时,破茬率上升趋势要比增大配重变化更明显,这说明选择合适的圆盘破茬刀能更有效地将根茬破开,提高破茬率。

5 结 论

1) 利用计算机软件对圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性的测试装置优化设计和建模,研制了圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测试装置。在此基础上,通过对圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测试装置运动分析得出,光面圆盘破茬刀上待测点的运动轨迹为光滑的摆线,半圆型缺口盘和阿基米德

表 5 试验结果分析
Table 5 Analysis of test results

试验号 Test No.	因素 Factor				试验指标 Test indicator
	A	B	C	D	破茬率 Stubble rate/%
1	1	1	1	1	86.56
2	1	2	2	2	87.33
3	1	3	3	3	89.50
4	2	1	2	3	90.42
5	2	2	3	1	91.22
6	2	3	1	2	91.08
7	3	1	3	2	93.17
8	3	2	1	3	95.23
9	3	3	2	1	94.19
K_1	263.39	270.15	272.87	271.97	
K_2	272.72	273.78	271.94	271.58	
K_3	282.59	274.77	273.89	275.15	
k_1	87.80	90.05	90.96	90.66	
k_2	90.91	91.26	90.65	90.53	
k_3	94.20	91.59	91.30	91.72	
极差 R Range R	6.40	1.54	0.65	1.19	
主次顺序 Order	$A > B > D > C$				
优水平 Optimal level	$A_3B_3D_3C_3$				
优组合 Optimal combination	A_3B_3				

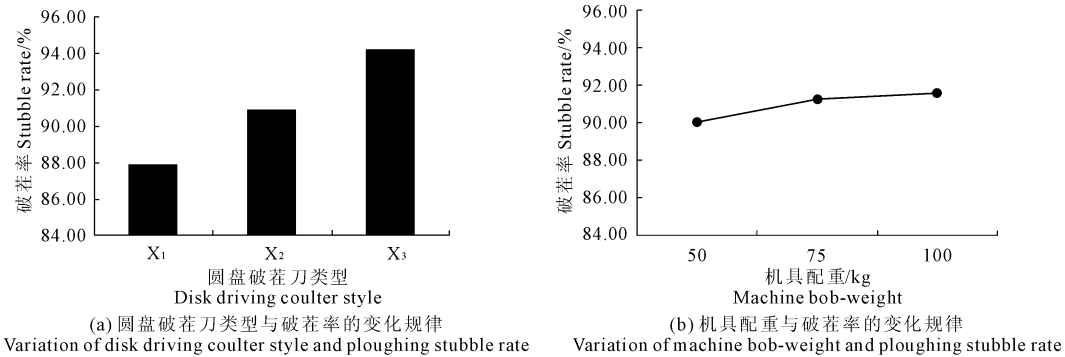


图 15 试验因素与指标的变化规律

Fig. 15 Variation of experimental factors and indicators

螺旋盘上待测点的运动轨迹为由不同长度的圆弧组成的云曲线,每个周期的圆弧个数由破茬盘上的缺口数决定。

通过对圆盘破茬刀切割玉米根茬的运动轨迹分析可知,机器配重影响运动轨迹的垂直位置及破茬率。

2) 通过对三种圆盘破茬刀进行运动学分析,分别对冲击情况、入土滑切角、切割速度和切割加速度变化进行了分析比较。建立阿基米德螺旋线型圆盘破茬刀切割根茬运动的运动学模型,得出了阿基米德螺旋线型圆盘破茬刀刀口上点的运动轨迹是由不同长度的圆弧组成的云曲线,建立了阿基米德螺旋线型圆

盘破茬刀刀口上点的运动方程。发现阿基米德螺旋线型圆盘破茬刀刀口上点的轨迹具备了光面圆盘破茬刀的摆线,以及半圆型缺口圆盘破茬刀的冲击性能,并且滑切角变化大,滑切性能更好。

3) 通过验证试验得出光面圆盘破茬刀上待测点的运动轨迹为光滑的摆线,半圆型缺口盘和阿基米德螺旋盘上待测点的运动轨迹为由不同长度的圆弧组成的云曲线,每个周期的圆弧个数由破茬盘上的缺口数决定。通过二因素三水平正交试验,计算得出各因素的极差值,确定因素的主次顺序,找出各因素优水平和优组合:选用阿基米德螺旋线型圆盘破茬刀、机具配重为 100 kg 时破茬效果最好,破茬率最高。

参考文献:

- [1] 董 智,邓林军,董 俊,等.免耕农业在辽西风沙半干旱区的机遇与挑战[J].辽宁农业科学,2016,(2):48-50.
- [2] 王跃勇,王利斌,张维安,等.长春地区免耕播种机的现状和建议[J].农机化研究,2016,2:264-268.
- [3] 林 静.农田保护性耕作技术与机具[M].北京:金盾出版社,2016,3:118-262.
- [4] 杨自栋,刘宁宁,耿端阳,等.2BYM-12型折叠式动力防堵免耕播种机设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(增刊1):46-50.
- [5] 李复辉,杜瑞成,刁培松,等.舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(增刊1):46-50.
- [6] 张军昌,闫小丽,薛少平,等.秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J].农业机械学报,2012,43(12):51-55.
- [7] 赵佳乐,贾洪雷,郭明卓,等.免耕播种机有支撑滚切式防堵装置设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(10):20-26.
- [8] 林 静,李 博,李宝筏,等.阿基米德螺旋线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J].农业机械学报,2014,45(6):100-104.
- [9] 王庆杰,何 进,李洪文,等.免耕播种机开沟防堵单元体设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(1):27-31.
- [10] 王庆杰,李洪文,何 进,等.凹形圆盘式玉米垄作免耕播种机的设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(7):117-121.
- [11] 王庆杰,何 进,梁忠辉,等.东北地区玉米垄作免耕播种机研究现状[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会, <http://www.cnki.net>.
- [12] 林 静,刘安东,李宝筏,等.2BG-2型玉米垄作免耕播种机[J].农业机械学报,2011,42(6):43-46.
- [13] 王庆杰,何 进,姚崇路,等.驱动圆盘玉米垄作免耕播种机设计与试验[J].农业机械学报,2008,39(6):68-72.
- [14] 马洪亮,高焕文,李洪文,等.驱动圆盘刀切断玉米秸秆和根茬的土槽试验[J].农业机械学报,2007,38(5):47-50.
- [15] 高焕文,李洪文,姚崇路.我国轻型免耕播种机研究[J].农业机械学报,2008,39(4):78-82.
- [16] 包文育.东北垄作免耕播种机关键部件研究与整机设计[D].沈阳:沈阳农业大学,2009.
- [17] 林 静,陈英心,李立新.免耕播种机械化技术分析[J].农机化研究,2010,4:232-235.
- [18] 王庆杰,何 进,姚崇路,等.驱动圆盘玉米垄作免耕播种机设计与试验[J].农业机械学报,2008,39(6):68-72.
- [19] 王庆杰,李洪文,何 建,等.并列组合式种肥分施防堵装置的设计与试验[J].农业机械学报,2008,39(12):73-77.
- [20] 高焕文,李洪文,姚崇路.我国轻型免耕播种机研究[J].农业机械学报,2008,39(4):78-82.
- [21] 李 卫,李问盈,孙先鹏.几种圆盘驱动破茬开沟性能的土槽试验比较[J].农机化研究,2008,(8):127-129.
- [22] 马洪亮,高焕文,李洪文,等.驱动圆盘刀切断玉米秸秆和根茬的土槽试验[J].农业机械学报,2007,38(5):47-50.
- [23] Zhang S X, Li Q, Zhang X P, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 124(1): 196-202.
- [24] Anyanzwa H, Okalebo J R, Othieno O, et al. Effects of conservation tillage, crop residue and cropping systems on changes in soil organic matter and maize-legume production: a case study in Teso District[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(1): 39-47.
- [25] Grisso R B, Holshouser D, Pitman R. Planter/drill consideration for conservation tillage Systems [R]. Virginia Cooperation Extension, 2007: 196-202.
- [26] Davut Karayel, Egidijus Savaushis. Effects of down-force on the performance of no-till disc furrow opener for clay-loam and loamy soils [J]. Agricultural Engineering. Research Papers, 2011, 43(3): 16-24.
- [27] <http://www.greatplainsmfg.com> 2016-4-18[2016-03-09].
- [28] 林 静,陆泽城,辛明金,等.一种运动轨迹测试装置:中国专利,201420396466.3[P].2014-11-26.
- [29] 陆泽城.圆盘破茬刀切割玉米根茬运动特性测试装置的设计与试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [30] Lin J, Qian W, Li B F, et al. Research on seeding depth stability of 2BG-2 type com ridge planting no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(9): 19-24.
- [31] 林 静,钱 巍,牛金亮.玉米垄作免耕播种机新型切拔防堵装置的研究与试验[J].沈阳农业大学学报,2015,46(6): 691-698.
- [32] 郝宝玉.免耕播种机土壤工作部件测试装置的设计与研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2015.
- [33] Lin J, Liu Y F, Li B F, et al. Effect of ridge-till and no-till mulching modes in Northeast China on soil physicochemical properties [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 58-64.
- [34] 李宏哲,林 静,李宝筏.免耕播种机在辽宁铁岭县的适应性研究[J].农机化研究,2014,36(8):49-51.
- [35] Lin J, Song Y Q, Li B F. Mechanical no-tillage sowing technology for northeast ridge area in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 50-57.
- [36] 林 静,李 博,李宝筏,等.阿基米德螺旋线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J].农业机械学报,2014,45(6):100-104.
- [37] 林 静,李宝筏,赵德芳,等.玉米根茬破茬阻力测试装置:中国专利,ZL 2012 10238635.6[P].2014-10-22.
- [38] 林 静,李 博,李宝筏,等.东北地区玉米垄作免耕播种机破茬装置的研究[J].沈阳农业大学学报,2013,44(2):193-200.
- [39] 李振陆.作物栽培[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [40] 刘纪麟.玉米育种学[M].北京:中国农业出版社,2002:50-38.
- [41] 李 博.免耕播种机新型破茬开沟装置的设计与试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2013.
- [42] 赵德芳.玉米根茬物理机械特性与切割阻力测试装置的试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2012.
- [43] 林 静,赵德芳,胡艳清,等.基于免耕播种的玉米根茬物理机械特性分析[J].农机化研究,2012,34(3):162-166.