

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.008

滑刀式开沟器设计与试验*

顾耀权^{1,2} 贾洪雷³ 郭慧¹ 赵文罡² 赵新天²

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林省农业机械研究院, 长春 130022;

3. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 针对滑刀式开沟器设计及制造随意性强、应用范围不够广泛的问题, 设计了12种具有不同厚度和滑切角的滑刀式开沟器, 并在实验室内通过土槽和压力机进行混合型正交试验, 试验指标为牵引阻力和正压力。试验结果表明, 滑切角是影响滑刀式开沟器作业性能的主要因素, 刃口曲线终点的滑切角 θ_A 在 $35^\circ \sim 55^\circ$ 范围内时开沟器具较好的综合性能。

关键词: 开沟器 滑切角 刃口曲线 设计 试验

中图分类号: S220.39; S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0038-05

Design and Experiment of Sliding Knife Furrow Opener

Gu Yaoquan^{1,2} Jia Honglei³ Guo Hui¹ Zhao Wengang² Zhao Xintian²

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. Jilin Province Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130022, China

3. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Twelve kinds of sliding knife furrow opener with different thickness and sliding cutting angle were designed in view of this issue about the casualness in the design and manufacture and limited application. Mixed type orthogonal test was carried out through soil bin and press in the laboratory with test index of traction resistance and vertical pressure. The test results showed that the sliding cutting angle was the main factor effecting its working performance, and the furrow opener possessed better comprehensive performance when its sliding cutting angle in the edge curve terminal point was in the range of $35^\circ \sim 55^\circ$.

Key words: Furrow opener Sliding cutting angle Edge curve Design Experiment

引言

开沟器是播种机、施肥机的关键作业部件, 按入土角不同可分为锐角开沟器和钝角开沟器。前者包括锄铲式、芯铧式和靴鞋式等, 后者具代表性的有滑刀式和圆盘式。锐角开沟器虽然入土性好, 但动土量大, 干、湿土易混合, 不利于保墒, 近些年随着保护性耕作的大力发展, 尤其是行间播种技术的不断应用, 在北方旱作区锐角开沟器有逐渐被钝角开沟器取代的趋势。钝角开沟器中的圆盘开沟器, 人们关

注得较多, 实际应用也较广泛, 但其作业效果与机具的结构质量关系很大, 在较硬土层上需要有足够的垂直载荷, 这使其在轻型免耕播种机具上的应用受到很大限制^[1]。相对来说, 对于滑刀式开沟器, 相关的著述和文献很少, 实际作业中也主要用作播种开沟器, 有时在整地情况较好的情况下用作施肥开沟器。滑刀式开沟器的设计和制造也存在较大的随意性, 导致在使用中, 入土性不好和易堵塞的问题时有发生。为提高其工作性能, 拓宽应用范围, 有必要进行深入研究。

收稿日期: 2012-05-28 修回日期: 2012-08-19

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B09, 2012BAD04B02, 2012BAD14B05)

作者简介: 顾耀权, 博士生, 吉林省农业机械研究院高级工程师, 主要从事田间作业机械研究, E-mail: guyaokuangyq@163.com

通讯作者: 贾洪雷, 教授, 博士生导师, 主要从事全程机械化与保护性耕作理论与技术研究, E-mail: jiahl@vip.163.com

本文根据不同的滑切角和开沟器厚度,设计12种滑刀式开沟器,并在实验室土槽和压力机上进行正交试验,得出影响滑刀式开沟器作业性能的主要因素,为滑刀式开沟器的设计提供理论依据。

1 滑刀式开沟器设计

滑刀式开沟器对土壤的作用是滑切,影响这种滑切作用的结构因素主要有刃口曲线、滑切角 θ 和滑刀厚度 δ 。

1.1 刃口曲线

文献[2~4]表明,滑切比砍切省力,而且切割阻力随着滑切角的增大而减小,随摩擦角的增大而增大。显而易见,对于滑刀式开沟器来说,刃口为曲线比直线更省力。设计中,选用指数函数曲线,并建立坐标系如图1所示。令 $l_{AC} = b$,A点坐标为 (x_A, y_A) ,则B、C两点坐标分别为 $B(x_A + l_{BC}, y_A + b)$, $C(x_A, y_A + b)$ 。分别过A、B两点作刃口曲线AB的切线,设开沟器运动方向沿X轴正向,则 θ_A 、 θ_B 为A、B两点的滑切角。为叙述方便,记B点为刃口曲线的最高点, θ_B 为起始滑切角。

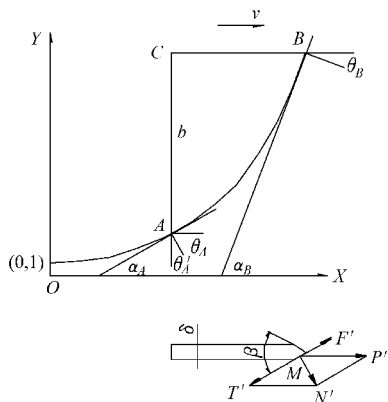


图1 滑刀设计示意图

Fig.1 Sketch map of sliding knife design

曲线AB的方程为

$$y = a^x \quad (a > 1)$$

求导数得

$$y' = y \ln a \quad (1)$$

因为 $\alpha_A = \frac{\pi}{2} - \theta_A$, $\alpha_B = \frac{\pi}{2} - \theta_B$ 所以A、B两点的导数分别为

$$y'_A = y_A \ln a = \tan \alpha_A = \tan \left(\frac{\pi}{2} - \theta_A \right) \quad (2)$$

$$y'_B = y_B \ln a = \tan \alpha_B = \tan \left(\frac{\pi}{2} - \theta_B \right) \quad (3)$$

$$\text{又} \quad y_B = y_A + b \quad (4)$$

联立式(2)~(4)整理可得

$$a = e^{(\cot \theta_B - \cot \theta_A)/b} \quad (5)$$

所以曲线AB的方程为

$$y = (e^{(\cot \theta_B - \cot \theta_A)/b})^x \quad (6)$$

为使开沟器具有较好的通用性,既能用于播种又能用于施肥,方程中参数 b 应根据最大施肥深度确定。以玉米为例,其最大施肥深度一般为100 mm左右,开沟深度应适当大于施肥深度,故取参数 $b = 150$ mm。若起始滑切角 θ_B 过小,则滑切的动作不能顺利完成,滑刀对土壤的扰动增大,土壤容易向上翻动,造成干、湿土混合,只有当 $\theta_B > \phi$ 时才能产生滑切作用^[5-6]。在田间试验地实际测得摩擦角 $\phi = 23^\circ$,故取 $\theta_B = 23^\circ$ 。很明显,从B点开始,刃口曲线AB上各点的滑切角逐渐增加,参数 θ_A 是影响牵引阻力,尤其是入土阻力的主要因素。在垂直入土的过程中滑刀与土壤的作用机理也是滑切,只是运动方向垂直向下,此时A点滑切角 θ'_A 为满足滑切条件,同样需要 $\theta'_A > \phi$,又 $\theta_A + \theta'_A = 90^\circ$,所以有 $\theta_A < 90^\circ - \phi$,即 $\theta_A < 67^\circ$ 。为结合试验,确定最优滑切角,在 $25^\circ \sim 75^\circ$ 范围内取6个 θ_A 值,设计并制造了6种不同滑切角的滑刀(表1及图2),编号依次为1~6。

表1 开沟器结构特性参数

Tab.1 Structural parameters of furrow opener

性能参数	编号					
	1	2	3	4	5	6
$\theta_A / (^\circ)$	25	35	45	55	65	75
l_{BC} / mm	67	81	94	111	129	157

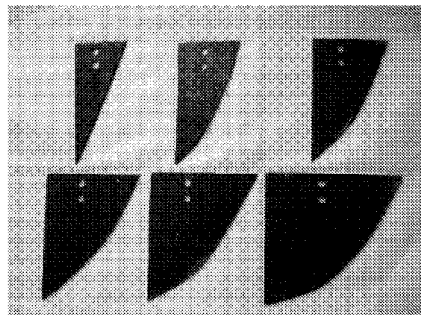


图2 不同滑切角的滑刀

Fig.2 Sliding knife with different sliding cutting angles

1.2 刃口角

被分离的土壤颗粒沿着刃口的两楔面向后滑移,如果楔角或刃口角过大,则滑切角 θ 减小,滑刀的切削阻力随之增加。取刃口楔面上一土壤颗粒为研究对象,进行受力分析(图1),颗粒沿刃口楔面向后滑移的条件是: $T' > F'$ 即 $N \tan \theta > N \tan \phi$,所以有 $\theta > \phi$,因为 $\theta + \beta/2 = 90^\circ$,所以 $\beta < 180^\circ - 2\phi$,即 $\beta < 134^\circ$ 。根据Kostritsyn的研究成果^[7],不论土壤与土壤之间的摩擦角 ρ 和土壤与金属之间的摩擦角 ϕ 如何变化,最小切削阻力总是在楔角接近 45° 时出现,所以取 $\beta = 45^\circ$ 。

滑刀式开沟器的整体结构中除了滑刀以外,还有开沟器柄和输肥(种)装置(图3)。为尽量减小这两部分对开沟器作业性能的不利影响,开沟器柄底端刃口角取 45° ,入土隙角应满足 $\gamma > \phi$,实际取 $\gamma = 30^\circ$,压缩弹簧起安全保护作用,防止遇到石块等硬物时损坏滑刀。

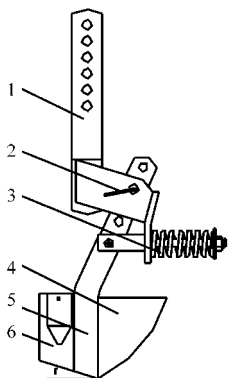


图3 滑刀式开沟器装配示意图

Fig. 3 Structure sketch map of sliding knife furrow opener

1. 固定柄 2. 圆柱销 3. 压缩弹簧 4. 滑刀 5. 开沟器柄
6. 输肥(种)口侧板

2 试验目的与方法

影响滑刀式开沟器作业性能的因素有土壤条件、滑切角、机具前进速度、开沟深度及滑刀厚度等,试验主要是考察滑切角 θ_A 和滑刀厚度 δ 及土壤坚实度对开沟器综合作业性能的影响,试验指标为牵引阻力和正压力,地点在吉林大学实验室。

根据前述按表1设计6种不同滑切角的滑刀,分别按厚度为3 mm和6 mm各制作一把,总计12把,材料选用65Mn钢。试验采用正交试验方法,选用 $L_{12}(6 \times 2^2)$ 混合型正交表,其中滑切角是需要重点考察的因素,取6个水平,其他相应的因素及水平如表2所示。为排除其他因素的干扰,便于所取得的试验数据能进一步与其他开沟器进行对比研究,试验用开沟器由两部分组成,即固定柄和滑刀。试验用土壤为黑壤土,取自长春市南郊新立城镇玉

表2 试验因素及水平
Tab. 2 Factors and levels

水平	因素		
	滑切角 $x_1 /$ ($^\circ$)	滑刀厚度 $x_2 /$ mm	土壤坚实度 x_3 / $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$
1	25	3	7.56
2	35	6	15.61
3	45		
4	55		
5	65		
6	75		

米种植区,也是进行田间试验的地点。

田间试验主要对实验室试验进行验证和补充,是定性试验。试验在2个地块进行,1个地块用灭茬机灭茬起垄,另一地块保持留茬状态,无秸秆覆盖,实际测得两地的含水率和坚实度分别为13.85%、17.67%和7.56、15.61 kg/cm^2 。

3 试验装置与结果

3.1 牵引阻力试验

在吉林大学土槽实验室进行,土槽长50 m、宽3 m,试验台自带计算机控制系统和数据采集与传输系统。试验前将土壤中的石块等硬物清除,沿土槽长度方向将土壤分成0~10 m(土样I)和10~20 m(土样II)2个区段,分别进行淋水、夯实等处理,并用土壤坚实度仪和土壤水分仪实时监测,直至接近在田间测得的灭茬起垄和免耕播种2种典型土壤条件为止。试验用开沟器连接在台车前部连接架上(图4),并与力传感器相连,开沟器的耕深均调为100 mm,台车行进速度为1.1 m/s。台车启动后计算机实时记录牵引阻力数据,到达第1区段终点处,停车并保存数据,然后重新启动进行第2区段测试。试验结果如表3所示,并绘制牵引阻力 Q 与 θ_A 关系曲线如图5所示。

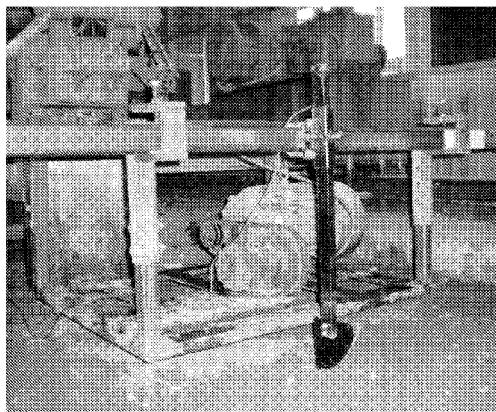


图4 牵引阻力试验

Fig. 4 Test of traction resistance

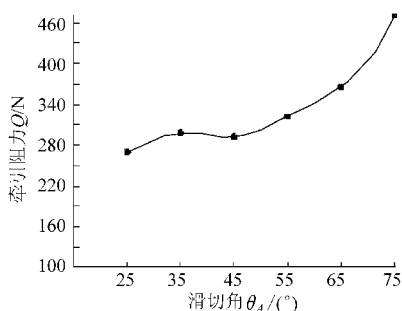


图5 牵引阻力与滑切角关系曲线

Fig. 5 Relation between traction resistance and sliding cutting angle

表3 试验结果
Tab.3 Test data

试验号	X_1	X_2	X_3	牵引阻力 Q/N	正压力 p/N
1	2	1	1	138.1	80.0
2	5	1	2	384.5	348.9
3	5	2	1	345.8	311.7
4	2	2	2	458.2	259.3
5	4	1	1	135.8	107.9
6	1	1	2	381.5	174.9
7	1	2	1	158.7	96.4
8	4	2	2	508.6	362.5
9	3	1	1	145.4	97.4
10	6	1	2	485.1	476.4
11	6	2	1	455.6	422.2
12	3	2	2	438.4	283.3
K_1	540.2	1 690.4	1 429.4		
K_2	596.3	2 345.3	2 606.3		
K_3	583.8				
K_4	644.4				
K_5	730.3				
K_6	940.7				
牵引阻力 k_1	270.1	281.7	238.2		
k_2	298.2	390.9	434.4		
k_3	291.9				
k_4	322.2				
k_5	365.2				
k_6	470.4				
极差	200.3	109.2	196.2		
K_1	271.3	1 285.5	1 115.6		
K_2	339.3	1 765.4	1 905.3		
K_3	380.7				
K_4	470.4				
K_5	660.6				
K_6	898.6				
正压力 k_1	135.7	214.3	185.9		
k_2	169.6	294.2	317.6		
k_3	190.1				
k_4	235.2				
k_5	330.3				
k_6	449.3				
极差	313.6	79.9	131.7		

3.2 正压力试验

在吉林大学动态仿生实验室进行,把试验用土壤分别装于2个木箱内,用前述方法对土壤进行处理直到满足要求。将开沟器装在万能试验机的卡头上,盛放土样的木箱放置在开沟器下方(图6)。打开主机电源及DOLI控制器开关,待启动后进入测试系统,设定垂直进深为100 mm,速度为1 mm/s,当开沟器尖部接触箱体中的物料时为其起始位置,计算机开始实时记录所施正压力数据,每把开沟器

试验2次,取其平均值,试验结果如表3所示,并绘制正压力 p 与 θ_A 关系曲线如图7所示。

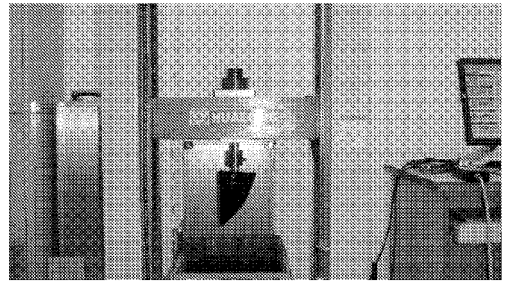


图6 正压力试验

Fig.6 Test of vertical pressure

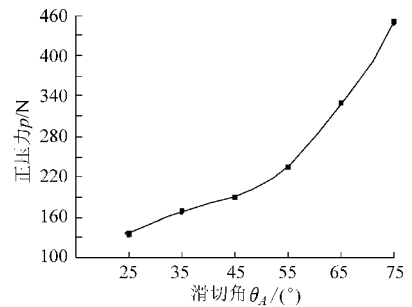


图7 正压力与滑切角关系曲线

Fig.7 Relation between vertical pressure and sliding cutting angle

3.3 田间试验

将滑刀式开沟器作为施肥开沟器安装在两行免耕播种机和行间播种机上,在灭茬起垄和留茬地分别进行田间试验。动力为福田雷沃18.4 kW拖拉机,前进速度3~5 km/h。2台机具结构质量为137 kg和152 kg,试验时加适量种子和化肥,分别在垄侧和垄沟开沟。

3.4 试验结果分析

由试验结果可知:3个因素对试验指标影响大小顺序依次为 X_1 、 X_3 、 X_2 ,即滑切角、土壤坚实度和滑刀厚度。厚度 δ 的极差都是最小的,是影响最小的因素,设计时取3 mm或4 mm均可。滑切角 θ_A 的极差都是最大的,即是影响最大的因素,且对于正压力的影响明显大于牵引阻力。

p 或 Q 与滑切角 θ_A 不是简单的线性关系。 p 或 Q 随 θ_A 的变化趋势基本相同,在 $25^\circ \sim 55^\circ$ 范围内,波动不大,当 $\theta_A > 55^\circ$ 时,2个指标均有明显上升。原因在于滑切角过大,使入土时压实的土壤聚集在较钝的滑刀尖部,形成坚硬的土核,这时土壤与土壤之间的摩擦是主要的,入土阻力自然增加,而且这种情况土层越硬越明显;另外牵引阻力的增大可能由于滑刀的表面面积明显增大,导致摩擦阻力增加。可见滑切角过大,滑刀式开沟器的性能有变差的趋势,尤其是入土阻力增加更为明显。综合来看,滑切角

在 $25^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 之间时, p 与 Q 的变化均较平缓, 综合性能指标比较理想, 这也同前面所论述的滑切角范围基本相符, 可以认为此区间是 θ_A 的最优取值范围。对于 1 号滑刀, θ_A 为 25° , 与 θ_B 近似相等, 刃口接近直线, 强度也不符合要求, 实用意义不大, 所以具体应用时 θ_A 在 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 范围内较好。

田间试验结果显示, 在灭茬起垄后的地块, 1 ~ 6 号开沟器均能正常作业, 开沟窄而平整, 土壤扰动小, 无推土和向上翻土现象, 表明滑刀对土壤的滑切正常。而在留茬地, 6 号开沟器入土不充分, 达不到作业要求, 其余开沟器入土和作业效果都较理想, 这

也验证了上述滑切角范围是合理的。

4 结论

(1) 影响滑刀式开沟器的牵引阻力和入土阻力的结构主要因素是滑切角 θ_A , 滑刀厚度 δ 是次要因素。

(2) 当起始滑切角 $\theta_B > \phi$ 时才能产生滑切作用。在 θ_B 相同的情况下, 滑切角 θ_A 为 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 时开沟器耕作阻力及入土阻力较小, 尤其是在较硬土层入土效果较好, 可以用作轻型免耕播种机和行间播种机的施肥开沟器。

参 考 文 献

- Murray J R, Tullberg J N, Basnet B B. Planters and their components [M]. Canberra Australian Centre for International Agricultural Research, 2006.
- 吉尔 W R, 范德伯奇 G E. 耕作和牵引土壤动力学 [M]. 耕作和牵引土壤动力学翻译组, 译. 北京: 中国农业机械出版社, 1983.
- Damora D, Pandey K P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed and fertilizer drills [J]. Soil and Tillage Research, 1995, 34(1): 127 ~ 139.
- Tessier S, Saxton K E, Papendick R I, et al. Zero tillage furrow opener effects on seed environment and wheat emergence [J]. Soil & Tillage Research, 1991, 21(34): 347 ~ 360.
- 寻怀义. 滑切理论探讨 [J]. 农业机械学报, 1979, 10(4): 107 ~ 111.
Xun Huaiyi. Discussion on the theory of sliding cutting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(4): 107 ~ 111. (in Chinese)
- 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选择 [J]. 华中农学院学报, 1982, 6(1): 64 ~ 69.
Pang Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle [J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982, 6(1): 64 ~ 69. (in Chinese)
- 西涅阿科夫 Г Н, 潘诺夫 И М. 土壤耕作机械的理论和计算 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1981.
- 张德文, 李林, 王惠民. 精密播种机械 [M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- 严霖元. 对农业机械工作部件滑切角的探讨 [J]. 江西农业大学学报, 1991, 13(1): 64 ~ 68.
Yan Linyuan. An approach to the sliding cutting angle of the working parts of agricultural machinery [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 1991, 13(1): 64 ~ 68. (in Chinese)
- 权龙哲, 佟金, 曾百功, 等. 玉米根茬铲切刀具的滑切刃曲线优化设计 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 13 ~ 17.
Quan Longzhe, Tong Jin, Zeng Baigong, et al. Optimization design on sliding cutting edge curve of cutting corn rootstalk [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 13 ~ 17. (in Chinese)
- 张守勤, 左春桢, 马成林. 圆盘开沟器受力模型的研究 [J]. 农业机械学报, 1998, 29(增刊): 37 ~ 40.
Zhang Shouqin, Zuo Chunzheng, Ma Chenglin. Research on force model of disk furrow opener [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(Sup.): 37 ~ 40. (in Chinese)
- 荣长发, 马成林, 张守勤. 疙瘩开沟器减粘降阻机理及试验研究 [J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 124 ~ 128.
Rong Changfa, Ma Chenglin, Zhang Shouqin. Mechanism on viscosity reducing and drag reduction of knot furrow opener [J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 124 ~ 128. (in Chinese)
- 余泳昌, 刘文艺, 赵迎芳, 等. 立柱式深松铲受力数学模型及试验分析 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 109 ~ 113.
Yu Yongchang, Liu Wenyi, Zhao Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subject [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 109 ~ 113. (in Chinese)
- 姚克恒, 刘世豪, 夏拥军, 等. 开沟机作业功耗的正交试验分析及其优化设计 [J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(6): 529 ~ 535.
Yao Keheng, Liu Shihao, Xia Yongjun, et al. Orthogonal experiment analysis and optimization design for operation power of ditcher [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 529 ~ 535. (in Chinese)
- 贾洪雷, 王刚, 姜铁军, 等. 1GH-3 型行间耕整机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 35 ~ 41.
Jia Honglei, Wang Gang, Jiang Tiejun, et al. Design and experiment of 1GH-3 inter-row tillage machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 35 ~ 41. (in Chinese)