

油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验\*

张青松 汲文峰 廖宜涛 廖庆喜

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 阐述了铧式开畦沟前犁装置的基本结构组成, 比较分析了铧式开畦沟前犁装置翻土型犁体曲面和改进型碎土型犁体曲面特征, 提出以犁体牵引阻力、犁耕比阻及功耗为主要评价指标, 借助高速数字化土槽试验平台, 开展了前进速度、沟深、沟宽、土壤坚实度等影响要素的试验研究。试验结果表明: 沟深对牵引阻力、犁耕比阻影响最显著, 前进速度、沟深对功耗影响最显著; 改进型犁体装置牵引阻力、犁耕比阻、功耗都分别为原设计犁体的 35% ~ 50%。

关键词: 油菜直播机 开畦沟犁 曲面分析 牵引阻力 犁耕比阻 功耗

中图分类号: S222.12+1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2014)02-0130-06

引言

长江中下游稻茬田土壤黏重板结, 土壤工作部件能耗大。南方雨水充沛, 根据油菜农艺种植要求, 需要开沟以便雨水排出。由华中农业大学工学院自行研制的 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机(以下简称直播机)开畦沟犁是直播机重要的土壤工作部件<sup>[1]</sup>, 也是保证油菜种植所需“三沟”(厢沟、腰沟、围沟)的重要措施。圆盘式和尖角式开沟器沟宽一般只有 30 ~ 50 mm, 常用于开种沟和肥沟, 达不到油菜种植需开畦沟的农艺要求, 而旋耕刀式开沟器结构复杂、功耗大、作业效率低、成本较高。直播机开畦沟犁借鉴铧式犁设计而成, 其结构简单、性能可靠, 可满足油菜种植开沟要求。相关研究表明, 耕地是农业生产田间作业中最基本的作业方式, 也是田间机械化中耗能最大的作业工序<sup>[2-5]</sup>。因此, 不同的犁曲面、安装作业方式和土壤工作部件作业对象都会不同程度地影响开畦沟犁的功耗<sup>[6-13]</sup>。

本文设计一种开畦沟前犁装置, 结合高速数字化土槽试验平台研究不同耕作速度、沟深、沟宽及土壤坚实度对原设计和改进型两开畦沟前犁牵引阻力、犁耕比阻及功耗的影响, 为犁体曲面的进一步优化及降低直播机整体功耗提供依据。

1 犁体设计与曲面分析

1.1 犁体设计

直播机开畦沟犁由两个开畦沟前犁和两个开畦

沟后犁组成, 布置在直播机两侧, 如图 1 所示。前犁主要功能是开沟, 以保证畦沟沟深和初步畦沟沟型; 后犁主要功能是收土, 以保证最终畦沟沟型<sup>[14-16]</sup>。根据直播机设计, 开畦沟前犁功耗大, 因此对原设计的开畦沟前犁进行优化设计获得改进型开畦沟前犁, 本文主要对开畦沟前犁进行研究。依据油菜农艺种植要求及直播机相关结构参数, 开畦沟犁体由犁柱、犁壁、犁铧 3 部分组成; 犁体耕深为 0.18 m, 耕宽为 0.17 m。图 2 为两犁体三维设计图。

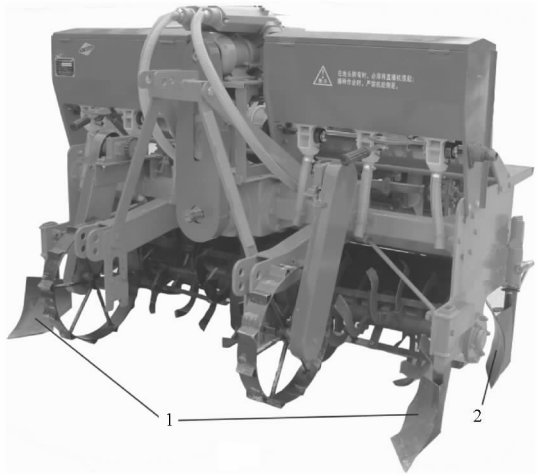


图1 直播机开畦沟犁安装示意图

Fig.1 Installation schematic map of ditch plow by direct seeder

1. 开畦沟前犁 2. 开畦沟后犁

1.2 曲面分析

原设计的开畦沟犁入土角  $\alpha$  为  $21.47^\circ$ , 改进型

收稿日期: 2013-03-09 修回日期: 2013-04-14

\* 国家自然科学基金资助项目(51105161)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD08B02)

作者简介: 张青松, 博士生, 主要从事农业装备设计与测控研究, E-mail: gxzqs2011@webmail.hza.edu.cn

通讯作者: 廖庆喜, 教授, 博士生导师, 主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

开畦沟犁入土角  $\alpha$  为  $14.09^\circ$ 。根据犁体水平直元线法原理可知,犁体曲面是水平直元线沿着导曲线在不同高度以不同直元线角(即直元线与  $XZ$  平面的夹角)旋转形成的。

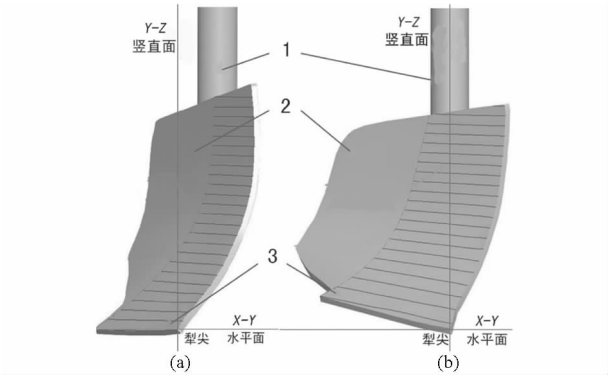


图2 开畦沟前犁犁体结构示意图  
Fig.2 Schematic map of plow structure  
(a) 原设计 (b) 改进型

1. 犁柱 2. 犁壁 3. 犁铧

1.2.1 导曲线分析

图3为犁体导曲线,表1为犁体导曲线参数。改进型犁铧刃起土角  $\varepsilon$  (数值上等于碎土角  $\beta$ ) 较小,导曲线开度较大,在作业过程中有利于土壤沿着犁体曲面向后方划出,减小犁体耕作阻力。

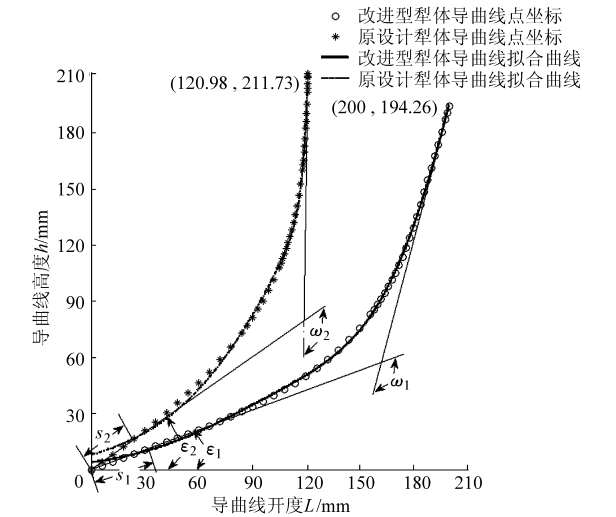


图3 犁体导曲线及拟合曲线  
Fig.3 Plow guiding curve and fitting curve

表1 导曲线参数

Tab.1 Guiding curve value

| 名称    | 犁铧                            | 两端点                       | 导曲线                   | 导曲线                 | 导曲线                 |
|-------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
|       | 起土角<br>$\varepsilon/(^\circ)$ | 切线夹角<br>$\omega/(^\circ)$ | 直线长度<br>$s/\text{mm}$ | 高度<br>$h/\text{mm}$ | 开度<br>$L/\text{mm}$ |
| 原设计犁体 | 19.45                         | 124.48                    | 36.09                 | 211.73              | 120.98              |
| 改进型犁体 | 33.77                         | 124.23                    | 38.18                 | 194.26              | 200.00              |

1.2.2 犁体直元线角

通过图4及表2犁体直元线角参数可知,改进型犁各元线角较大,范围在  $41.36^\circ \sim 48.58^\circ$  之间,在

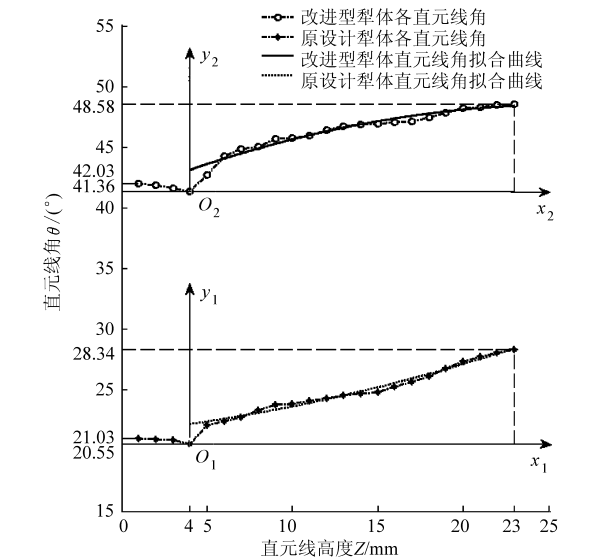


图4 犁体各直元线角图  
Fig.4 Plow horizontal straight generatrix angle

表2 直元线参数

Tab.2 Straight generatrix value (°)

| 名称    | 起始角 $\theta_0$ | 最小角 $\theta_{\min}$ | 最大角 $\theta_{\max}$ |
|-------|----------------|---------------------|---------------------|
| 原设计犁体 | 21.03          | 20.55               | 28.34               |
| 改进型犁体 | 42.03          | 41.36               | 48.58               |

作业过程中有利于土壤沿着犁体曲面向旁边翻出,以便开沟成型。通过拟合曲线和元线角变化规律可知,改进型犁犁体曲面接近碎土型犁体曲面。

2 高速数字化土槽试验

2.1 试验对象与目的

研究铧式开畦沟前犁装置及其改进型犁体的牵引阻力  $F_x$ 、犁耕比阻  $K$ 、功耗  $P$  与沟深  $a$ 、沟宽  $b$ 、土壤坚实度  $p$ 、耕作速度  $v$  的变化关系,并结合犁体曲面分析的结果,为后续的犁体曲线优化和降低直播机整体功耗提供参考<sup>[17]</sup>。

2.2 试验装置

试验装置为高速数字化土槽试验台。该土槽试验台能够对土壤工作部件田间工况进行模拟。

测试系统为六维力传感器测试系统(合肥旭宁科技有限公司),该测试系统与计算机相连,可进行数据采集及实时显示。

试验时,由开畦沟前犁、沟宽调节部件、六维力传感器及支撑架组成的犁体试验台架安装在试验台车的前悬挂装置上进行试验。图5为土槽试验台及测试系统示意图,图6为试验犁体安装示意图。

2.3 试验因素与水平

依据油菜直播机工作参数、油菜种植农艺要求及高速数字化土槽适用范围,土槽试验选取台车前进速度  $v$ 、沟深  $a$ 、沟宽  $b$  和土壤坚实度  $p$  作为试验

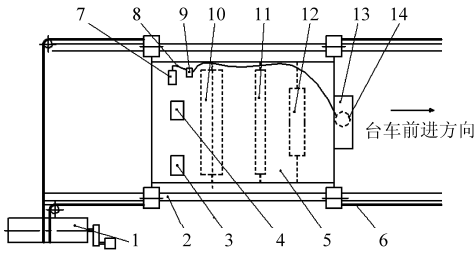


图 5 土槽试验台及测试系统示意图

Fig.5 Schematic map of soil bin test device and test system

- 1. 无极调速动力驱动系统 2. 台车轨道 3. 手动控制系统
- 4. 自动控制系统 5. 台车 6. 无极调速牵引系统 7. PC 机
- 8. USB 数据线 9. 数据采集器 10. 镇压辊 11. 刮土板 12. 旋耕机
- 13. 前悬挂 14. 六维力传感器

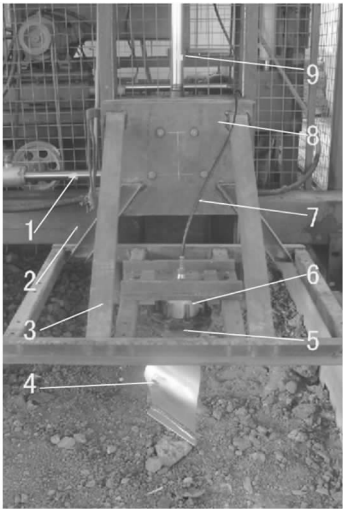


图 6 试验犁体安装示意图

Fig.6 Installation map of experimental plow

- 1. 水平液压缸 2. 台车 3. 支撑架 4. 开畦沟前犁 5. 沟宽调节部件
- 6. 六维力传感器 7. USB 数据线 8. 前悬挂 9. 竖直液压缸

因素,进行单因素试验。每种工况重复 3 次,取平均值作为最终试验值。单因素试验基本参数为  $v = 0.6\text{ m/s}$ 、 $a = 0.18\text{ m}$ 、 $b = 0.17\text{ m}$ 、 $p = 450\text{ kPa}$ 。单因素试验时只改变其中一个因素参数值,其他因素的参数值不变。单因素试验取值范围为: $v = 0.2 \sim 1.0\text{ m/s}$ ,间隔  $0.1\text{ m/s}$ ; $a = 0.10 \sim 0.24\text{ m}$ ,间隔  $0.02\text{ m}$ ; $b = 0.15 \sim 0.19\text{ m}$ ,间隔  $0.01\text{ m}$ ; $p = 250 \sim 750\text{ kPa}$ ,间隔为  $100\text{ kPa}$ 。

2.4 试验条件与步骤

试验中土槽土壤为砂壤型,土壤干基含水率为  $13.08\%$ 。为使土槽土壤各处状况尽可能地符合试验要求,保持土槽试验区域内土面水平、土壤含水率一致、各处土壤坚实度一致。每次试验均进行人工翻土整平-旋耕-刮土平整-压实等过程,以保证测试数据的真实性。试验时,试验测试区域  $AD$  长度为  $20\text{ m}$ ,从  $AA$  所示起始线开始采集数据到  $DD$  所示终止线停止采集,以保证测试数据的有效性,如图 7 所

示。每次试验均依照上述试验步骤进行。试验每隔  $3\text{ d}$  测 1 次土壤含水率以保持土槽土壤含水率稳定。

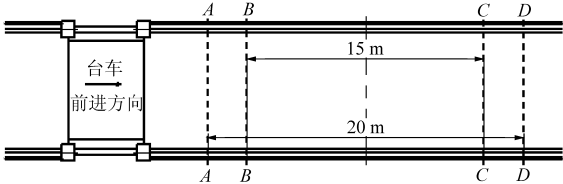


图 7 试验区域示意图

Fig.7 Schematic map of test area

3 数据处理与结果分析

3.1 数据处理

在试验开始及停止过程中,由于台车有加速及减速的阶段,速度不稳定,数据分析时去掉试验测试区域  $AD$  两头各  $2.5\text{ m}$  内采集的数据,只分析测试有效区域  $BC$  内  $15\text{ m}$  采集的数据。

3.2 结果分析

3.2.1 方差分析

方差分析如表 3 所示。改进型犁,因素  $v$ 、 $a$ 、 $b$  对牵引阻力  $F_x$  都有显著性影响;原设计的铧式开畦沟前犁装置,只有因素  $a$  对其有显著性影响;因素  $p$  对两犁体都没有显著性影响。

表 3 方差分析结果

Tab.3 Results of variance analysis

| 因素  | 改进型犁体  |        |     | 原设计犁体 |        |     |
|-----|--------|--------|-----|-------|--------|-----|
|     | $F$    | 显著水平   | 显著性 | $F$   | 显著水平   | 显著性 |
| $v$ | 5.94   | 0.011  | **  | 1.24  | 0.334  | *   |
| $a$ | 124.39 | <0.001 | *** | 15.11 | <0.001 | *** |
| $b$ | 6.95   | <0.001 | *** | 3.04  | 0.070  | *   |
| $p$ | 0.50   | 0.771  | *   | 0.76  | 0.597  | *   |

注:\*\*\*表示极显著,\*\*表示显著,\*表示不显著。

3.2.2 牵引阻力  $F_x$

两犁体牵引阻力均随  $v$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $p$  增大而增大,如图 8 所示。在各因素下,原设计的铧式开畦沟前犁装置牵引阻力增幅都大于改进型犁牵引阻力增幅,因素  $a$  对两犁牵引阻力增幅影响最为明显。在各因素下,原设计的铧式开畦沟前犁装置牵引阻力平均值为  $812.32\text{ N}$ ,而对应的改进型犁牵引阻力平均值为  $307.43\text{ N}$ ,仅为原设计的铧式开畦沟前犁装置的  $37.5\%$ ;改进型犁对牵引阻力影响因素排序由大到小依次为  $a$ 、 $b$ 、 $v$ 、 $p$ 。

3.2.3 犁耕比阻  $K$

犁耕比阻是衡量犁体综合性能的指标,其值等于犁体牵引阻力  $F_x$  与沟深  $a$  沟宽  $b$  乘积的比值,即

$$K = \frac{F_x}{ab} \tag{1}$$

各因素对两犁犁耕比阻影响规律基本上与对

牵引阻力的影响规律相同。在各因素下,两犁的犁耕比阻都随因素水平值的增大而增大,因素 $a$ 对两犁的犁耕比阻增幅影响最为明显;在一定工况下,原设计的铧式开畦沟前犁装置的犁耕比阻

为1.5~3.5,改进型犁耕比阻为0.5~1.5,改进型犁的犁耕比阻仅为原设计的铧式开畦沟前犁装置的40%左右。两犁犁耕比阻与各因素关系曲线如图9所示。

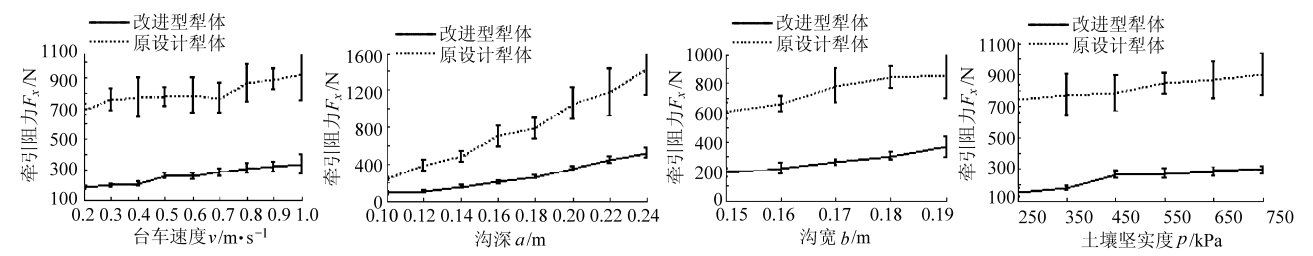


图8 牵引阻力 $F_x$ 与各因素的关系曲线  
Fig. 8 Analysis result of traction resistance  $F_x$

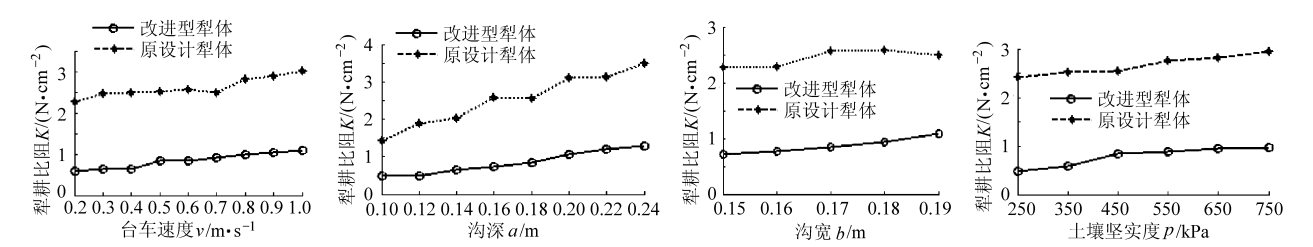


图9 犁耕比阻 $K$ 与各因素的关系曲线  
Fig. 9 Analysis result of plowing specific resistance  $K$

**3.2.4 功耗  $P$**   
在犁体耕作中,功率消耗 $P$ 等于犁体牵引阻力 $F_x$ 与前进速度 $v$ 的乘积,即

$$P = F_x v \quad (2)$$

两犁体功耗均随 $a$ 、 $b$ 、 $v$ 、 $p$ 增大而增大,改进型犁功耗增幅都小于原设计的铧式开畦沟前犁装置功耗增幅,且随 $v$ 、 $a$ 增大,两犁体功耗增幅最为显著;

在各因素下,改进型犁的功耗都明显小于原设计的铧式开畦沟前犁装置,原设计的铧式开畦沟前犁装置的功耗平均为513.21 W,改进型犁功耗平均为231.56 W,仅为原设计的铧式开畦沟前犁装置的46%;改进型犁对功耗影响因素排序由大到小依次为 $v$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $p$ 。图10为两铧式开畦沟前犁装置功耗与各因素的关系曲线。

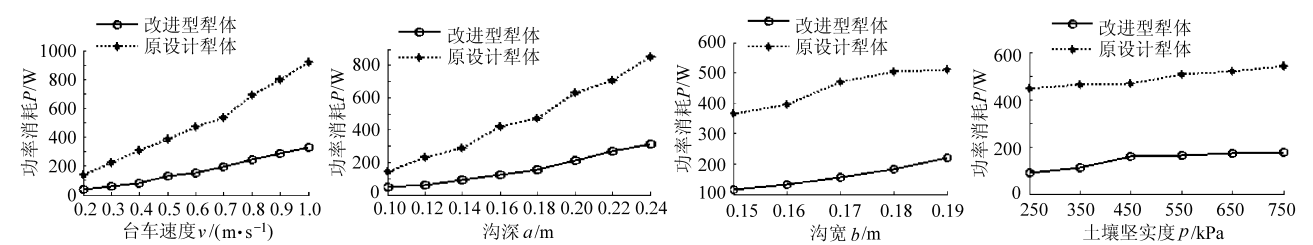


图10 功耗 $P$ 与各因素的关系曲线  
Fig. 10 Analysis result of power consumption  $P$

## 4 田间试验

将两铧式开畦沟前犁装置作为开畦沟前犁分别安装在2BFQ-6型油菜精量联合直播机上,在保证两次试验地块相同,沟深、沟宽相同的情况下,进行田间试验。田间土壤含水率为21.3%,土壤坚实度为513 kPa。动力为41 kW的雷沃M554型农用拖拉机,前进挡位置于慢2挡,速度为3~4 km/h。

田间试验结果表明,两铧式开畦沟前犁装置都可以开出所要求的沟深、沟宽沟型。原设计的铧式开畦沟前犁装置在作业过程中,土垡沿犁体曲面后

侧方滑出不流畅,堵塞较严重,拖拉机行走出现冒黑烟的情况,田间作业功耗较大。相对于原设计的铧式开畦沟前犁装置,改进型铧式开畦沟前犁装置开出的沟型整齐,沟底和沟壁平整,且在行走过程中,土块能够顺利沿犁体曲面后侧方滑出,拖拉机行走顺畅。由田间试验结果可知,改进型铧式开畦沟前犁装置整体性能明显优于原设计的铧式开畦沟前犁装置。

## 5 结论

(1)设计了一种铧式开畦沟前犁装置,其主要

由犁柱、犁壁和犁铧组成,理论设计的犁体耕深和耕宽分别为 0.18 m 和 0.17 m。通过犁体曲面分析得出:改进型犁入土角  $\alpha$  和犁刃起土角  $\varepsilon$  较小,导曲线开度较大为 200 mm,各水平元线角较大,角度范围在  $41.36^\circ \sim 48.58^\circ$  之间,土壤易沿曲面滑出,耕作阻力小。改进型犁犁体曲面接近碎土型犁体曲面替代翻土型犁体曲面。

(2)通过高速数字化土槽试验结果显示:犁体牵引阻力、犁耕比阻、功耗在各试验因素下都呈递增趋势,其中沟深对牵引阻力、犁耕比阻影响最显

著,台车前进速度、沟深对功耗影响最显著;改进型犁的牵引阻力、犁耕比阻、功耗都仅为原设计的铧式开畦沟前犁装置对应指标的 35% ~ 50%,减小 50% 以上。田间试验结果表明,改进型铧式开畦沟前犁装置开出的沟型整齐,沟底和沟壁平整,且在行走过程中,土块能够顺利沿犁体曲面后侧方滑出,拖拉机行走顺畅。

(3)由分析可得知,沟深对改进型犁牵引阻力、犁耕比阻影响大,台车前进速度、沟深对改进型犁功耗影响大。

## 参 考 文 献

- 田波平,廖庆喜,黄海东,等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机的设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 211-213.
- 罗海峰,官春云,汤楚宙,等. 稻茬田油菜免耕播种机开沟部件的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 153-157.  
Luo Haifeng, Guan Chunyun, Tang Chuzhou, et al. Ditching parts of no-tillage sower in paddy stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 153-157. (in Chinese)
- 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003.
- 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:科学技术出版社, 1995.
- 张孝安. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- 曾德超. 在旱作沙壤土上铧犁犁体曲面性能的分析[J]. 农业机械学报, 1962, 5(1): 37-60.  
Zeng Dechao. Analysis of the turning and pulverizing processes of plow bottom surface on sandy loamy soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1962, 5(1): 37-60. (in Chinese)
- 曾德超. 旱作沙壤土上铧犁犁体曲面阻力分析[J]. 农业机械学报, 1964, 7(2): 80-96.  
Zeng Dechao. Draft resistance of various parts of a plow bottom in sandy loam soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1964, 7(2): 80-96. (in Chinese)
- 洪筠,崔占荣,任露泉. 仿生犁与普通犁作业综合经济效益的对比分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 93-96.  
Hong Yun, Cui Zhanrong, Ren Luquan. Analysis on whole economic benefits of bionic plow and common plows plowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 93-96. (in Chinese)
- 姜颖. 基于动力学仿真的犁曲面工作性能影响因素研究[D]. 南宁:广西大学, 2008.  
Jiang Ying. Study on influencing factors of plow surface working performance based the dynamic simulation [D]. Nanning: Guangxi University, 2008. (in Chinese)
- Sanchez-Giron V, Ramirez J J, Litago J J, et al. Effect of soil compaction and water content on the resulting forces acting on three seed drill furrow openers[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 81(1): 25-37.
- Sasaki C M, Goncalves J L D, da Silva A P. Ideal subsoiling moisture content of Latosols used in forest plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 243(1): 75-82.
- Kasisira L L, du Plessis H L M. Energy optimization for subsoilers in tandem in a sandy clay loam soil[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 86(2): 185-198.
- He J, Li H W, Wang X Y, et al. The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(2): 493-502.
- 袁中文,王新忠,陈翠英. 双翼翻土防漏耕犁犁体的 3D+2D 设计研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(6): 36-38.  
Yuan Zhongwen, Wang Xinzong, Chen Cuiying. The study on 3D+2D design of a two-wing turning anti-missing plow bottom [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6): 36-38. (in Chinese)
- 胡中. 水平直元线犁体曲面导曲线的一般方程式及其参数[J]. 农业机械学报, 1979, 10(4): 67-73.  
Hu Zhong. The general equation and parameters of the guiding curve of plow bottom surface formed by horizontal straight-line elements[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979, 10(4): 67-73. (in Chinese)
- 余贵珍,吴成武,丁能根. 犁体参数化设计系统的研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 49-51.  
Yu Guizhen, Wu Chengwu, Ding Nenggen, et al. Research on parametric design system of plow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 49-51. (in Chinese)
- 于艳,龚丽农,尚书旗. 农机土槽试验动力学参数测试系统的研制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(13): 323-328.  
Yu Yan, Gong Linong, Shang Shuqi. Development of soil bin test dynamic parameters measurement system[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(13): 323-328. (in Chinese)

## Surface Analysis and Resistance Characteristics Experiment on Ditch Plow Ahead of Direct Rapeseed Seeder

Zhang Qingsong Ji Wenfeng Liao Yitao Liao Qingxi  
(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Since ditch plow of direct rapeseed seeder would directly affect ditch quality and power consumption, a ditch plow and an optimized plow were designed and studied comparatively. The basic structure of the ditch plow was investigated and the characteristic of the digging-type surface of ditch plow and the smashing-type surface of the optimized plow were comparatively analyzed. Furthermore, taking traction resistance, plowing specific resistance, and power consumption as the evaluation indices, the experimental research on the impact factors of forward speed, ditch depth, ditch width, soil firmness were conducted by the high speed digitized soil bin platform. The experimental results showed that the greatest impact factor on traction resistance and plowing specific resistance was ditch depth, and the greatest impact factor on power consumption were forward speed and ditch depth. The traction resistance, plowing specific resistance, power consumption of the optimized plow were all only 35% ~ 50% of the ditch plow's respectively. The research conclusion had great theoretical value and practical significance to the optimization of ditch plow and the power consumption reduction of precision rapeseed planter.

**Key words:** Direct rape seeder Ditch plow Surface analysis Traction resistance Plowing specific resistance Power consumption

(上接第 108 页)

## A Combinational Threshing and Separating Unit of Combine Harvester with a Transverse Tangential Cylinder and an Axial Rotor

Xu Lizhang<sup>1</sup> Li Yaoming<sup>1</sup> Wang Chenghong<sup>1</sup> Xue Zhen<sup>2</sup>  
(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. Jiangsu Changfa-fengling Agricultural Equipment Co. Ltd., Taizhou 225300, China)

**Abstract:** With the development of rice harvesting with large scale in China, high-efficiency of combine is more and more important. In order to satisfy the urgent demand of high-efficiency combine, the overall structure of a new crawler-type combine with a feed rate of 4 ~ 5 kg/s was proposed and the combinational threshing and separating unit with a transverse tangential cylinder and axial rotor was designed. The design focused on the designing process of structural and operational parameters of tansverse tangential cylinder tangential concave, transition section between tansverse tangential concave and rotor concave, axial rotor and concave. Field test showed that the total loss was 1.47% and the damage rate was 0.2%, when the feed rate was 4.86 kg/s, which met the demands of the design.

**Key words:** Combine harvester Tangential-longitudinal axial Design Experiment