

油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验*

张青松 廖庆喜 汲文峰 刘宏博 周洋 肖文立

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要:为减小油菜直播机开沟系统牵引阻力并分析机组不同作业速度对牵引阻力影响的规律,开展了开畦沟犁体曲面参数与作业速度的试验研究。建立了 EDEM 离散元土壤仿真模型,以犁体牵引阻力为试验指标分别开展以铧刃起土角、导曲线开度、直元线起始角、直元线最大角及作业速度为试验因素的试验;构建了犁体曲面优化模型,并开展了犁体曲面的 3D 打印及试制加工。仿真试验结果表明:在试验范围内,牵引阻力随铧刃起土角增大而减小,分别随导曲线开度、直元线起始角、直元线最大角增大而增大,随作业速度的增大而急剧增大,作业速度从 1.0 m/s 增加到 2.0 m/s,牵引阻力及功耗分别为前者的 1.98 倍及 3.97 倍;仿真优化结果表明:当犁体在一定工作参数条件下,铧刃起土角为 15°,导曲线开度为 190 mm,直元线起始角为 35°,直元线最大角为 40°时,犁体牵引阻力最小为 241.11 N,比优化前减少 11.26%。为考察优化犁体实际田间作业效果,对犁体进行 3D 打印及试制加工并与原有犁体进行田间对比试验,结果表明优化犁体作业的畦沟沟底大块土堡少,残留土壤质量减少 62.87%,沟底干净,T 型沟明显。

关键词:油菜直播机 开沟犁体 曲面优化

中图分类号: S222.12⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)01-0053-07

Surface Optimization and Experiment on Ditch Plow of Direct Rapeseed Seeder

Zhang Qingsong Liao Qingxi Ji Wenfeng Liu Hongbo Zhou Yang Xiao Wenli

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to reduce the traction resistance of ditch plow system and analyze the influence of operating speed on ditch plow system, the parameters of plow surface and operating speed were studied. The EDEM model of soil-plow simulation was established. The experiment was made with traction resistance as target and plow blade angle, opening of guiding curves, starting angle of straight-line elements, maximal angle of straight-line elements and operating speed as factors. The simulation results showed that during the range of the experiment, traction resistance decreased when plow blade angle increased while it increased when opening of guiding curves, starting angle of straight-line elements, maximal angle of straight-line elements increased, respectively. Traction resistance increased rapidly when operating speed increased. When operating speed ranged from 1.0 m/s to 2.0 m/s, traction resistance and power consumption became 1.98 times and 3.97 times bigger, respectively. The simulation optimization results indicated that under certain working conditions, when the values of plow blade angle, opening of guiding curves, starting angle of straight-line elements, maximal angle of straight-line elements were 15°, 190 mm, 35° and 40° respectively, the minimal value of traction resistance was 241.11 N, 11.26% less than before. In order to observe the field working performance of

收稿日期: 2014-04-17 修回日期: 2014-05-24

* 国家自然科学基金资助项目(51275197、51105161)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(20013BAD08B02)、国家油菜产业技术体系专项资助项目(CARS-13)、中央高校基本科研业务费资助项目(2014PY033)和武汉市高新技术产业科技创新团队项目(2014070504020240)

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

optimized plow, the plow were printed by 3D printers and manufactured in the factory, and contrastive experiment was carried out. The results showed that compared with the former, the number of large soil block was smaller and the quality of residual soil was 62.87% less at the bottom of ditch, and the T-shape of ditch was more obviously. The research conclusions could provide reference for the future optimization of ditch plow system and operating study of actual field working speed.

Key words: Direct rape seeder Ditch plow Surface optimization

引言

根据长江中下游油菜农艺种植需要开畦沟的要求,自行研制了2BFQ-6型油菜直播机开畦沟系统^[1]。不同犁体曲面犁体所需的牵引阻力及开畦沟作业效果与犁体的工作参数及曲面参数密切相关^[2-3]。为降低开畦沟系统的牵引阻力,提高作业质量及研究机组不同作业速度对系统牵引阻力的影响,开展了开畦沟犁体曲面参数与作业速度关系的试验研究。前后犁体根据铧式犁相关原理设计而成,犁体曲面为不规则的空间曲面,土槽试验及田间试验只能对犁体工作参数进行研究,对其曲面结构参数研究较困难,且由于土槽试验运行参数的限制及田间试验工况的复杂性,难以准确研究作业速度对系统牵引阻力的影响规律,运用模拟仿真技术可以较方便地改变犁体曲面参数及工作参数,为犁体研究提供便捷手段。

有限元法主要对均匀单一材质连续体问题加以模拟研究,而土壤组成成分复杂,为由许多土壤颗粒及其他成分组成的散粒体问题。离散元单元法是研究不连续体问题的一种数值模拟方法,其可以通过单元间多种连接方式来体现土壤等多相介质的不同物理关系,从而有效地模拟土壤开裂、分离等非连续现象及土壤模型与工作部件相互作用的作用力^[4-9]。

本文建立 EDEM 离散元土壤仿真模型并通过土槽试验结果来验证模型的正确性,对犁体曲面参数及作业速度进行 EDEM 仿真,得出优化开沟犁体曲面参数及不同作业速度下犁体牵引阻力变化规律;结合优化结果进行犁体的 3D 打印及试制加工,通过田间对比试验,考察优化犁体实际田间作业效果。

1 开畦沟系统基本结构

油菜直播机开畦沟系统由两前犁和两后犁组成,如图 1 所示,该系统两前犁对称布置在直播机前侧,间距为 1 800 mm,主要用于开沟起土,犁体上下可调,可调节沟深;两后犁对称布置在直播机后侧,即两前犁正后方,间距为 1 800 mm,主要用于清沟整

形,犁体上下可调,左右可旋转,可调节沟深及沟宽。同一侧前后犁间距为 650 mm,油菜直播机作业时,前后犁体配合作业,形成油菜农艺种植要求的畦沟。



图 1 直播机开畦沟系统安装示意图

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

1. 开畦沟系统前犁 2. 前犁调节装置 3. 开畦沟系统后犁
4. 后犁调节装置

自行设计的前犁及后犁由犁柱、犁壁、犁铧 3 部分组成。犁体曲面根据铧式犁相关原理设计而成,根据设计要求,前犁开沟起土,耕作阻力较大,犁体曲面设计为扭柱型,具有较强的碎土和翻土性能。后犁主要是清沟整形,耕作阻力相对较小且为使作业后厢面平整,后犁不需要很强的翻土性能,后犁的犁体曲面设计为圆柱型。根据油菜直播机设计要求,开畦沟系统犁体设计的常规作业速度为 0.4 ~ 1.0 m/s,耕深为 180 mm,耕宽为 170 mm。

2 仿真模型建立与验证

2.1 模型建立

2.1.1 力学模型

离散元接触力学模型可分为软球模型和硬球模型。由于土壤颗粒和犁体相对运动速度较低且土壤颗粒之间具有一定黏结作用,本文采用 Hertz - Mindlin 黏结软球模型^[10-12]。模型中主要包含物理性质参数(切向弹性系数 k_t 、法向弹性系数 k_n 、切向阻尼系数 C_t 、法向阻尼系数 C_n)及几何参数(法向重叠量 δ_n 和切向重叠量 δ_t)。

2.1.2 参数选择

模型中,根据弹性模量 E 、剪切模量 G 计算确定

切向弹性系数 k_t 、法向弹性系数 k_n ^[13]; 根据对应的法向和切向弹性系数、材料密度 ρ 、恢复系数 e 计算确定切向阻尼系数 C_t 、法向阻尼系数 C_n ^[14]; 切向接触力 F_t 根据 Mindlin 理论^[15] 计算得出, 两球法向接触力 F_n 根据 Hertz 理论^[16] 计算得出; 根据 Hertz 接触理论, 颗粒碰撞过程中, 将颗粒视为各向同性材料, 剪切模量 G 与弹性模量 E 关系为

$$G_j = \frac{E_j}{2(1 + \nu_j)} \quad (j = 1, 2) \quad (1)$$

式中 G_j ——颗粒 j 的剪切模量

ν_j ——颗粒 j 的泊松比

E_j ——颗粒 j 的弹性模量

根据剪切模量 G 、弹性模量 E 和泊松比 ν 之间关系, 给出其中 2 个参数即可确定第 3 个参数。本文运用 EDEM 软件开展仿真试验研究, 仿真模型如图 2 所示, 仿真参数如表 1 所示。

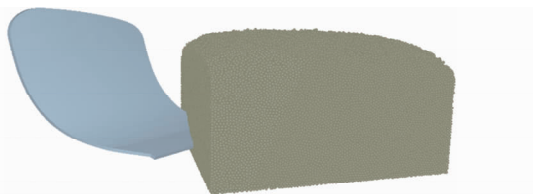


图 2 犁体曲面 EDEM 仿真模型

Fig. 2 EDEM simulation model of plow surface

表 1 EDEM 仿真主要参数

Tab. 1 EDEM main simulation parameters

参数属性	参数	数值
土壤颗粒属性	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600
	剪切模量 G / Pa	2.5×10^7
	泊松比 ν	0.5
	颗粒半径 r / mm	2
犁体材料属性	密度 $\rho' / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
	剪切模量 G' / Pa	7.0×10^{10}
	泊松比 ν'	0.3
相互作用	颗粒与颗粒静摩擦因数 μ_{11}	0.4
	颗粒与颗粒动摩擦因数 μ_{12}	0.35
	颗粒与颗粒碰撞恢复因数 e_1	0.12
	颗粒与犁体静摩擦因数 μ_{21}	0.3
	颗粒与犁体动摩擦因数 μ_{22}	0.25
	颗粒与犁体碰撞恢复因数 e_2	0.2
其他参数	重力加速度 $g / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.81
	犁体耕深 b / mm	180
	犁体耕宽 a / mm	170
	颗粒数目 $N / \text{个}$	430 000

2.2 模型验证

2.2.1 试验方法

为验证上述模型的合理性, 开展数值模拟并与土槽试验结果进行对比。数值模拟及土槽试验以现有油菜直播机开沟犁体为对象。试验过程中, 以

作业速度 v 为试验因素, 保持犁体耕深为 180 mm, 耕宽为 170 mm, 试验方案及结果如表 2 所示。

2.2.2 试验结果分析

表 2 中, 数值模拟值与土槽试验值变化趋势相同, 随作业速度增大, 犁体牵引阻力增大。数值分析结果和土槽试验结果相对误差在 $-1.73\% \sim 11.33\%$ 之间, 此误差在可接受范围内, 表明本文模型参数设置的合理性。

表 2 验证试验及结果

Tab. 2 Validation experiment and results

试验编号	试验水平值 $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	土槽试验值 F_1 / N	仿真模拟值 F_2 / N	误差 $/ \text{N}$	百分比 $/ \%$
1	0.2	179.49	188.44	8.95	4.99
2	0.3	194.33	207.67	13.34	6.86
3	0.4	200.35	223.05	22.70	11.33
4	0.5	256.78	252.34	-4.44	-1.73
5	0.6	260.00	271.71	11.71	4.50
6	0.7	280.15	287.81	7.66	2.74
7	0.8	307.04	310.78	3.74	1.22
8	0.9	316.15	325.04	8.89	2.81
9	1.0	331.97	351.31	19.34	5.83

3 EDEM 仿真试验与优化分析

3.1 试验因素与水平

前后犁体曲面根据铧式犁水平直元线法设计而成, 由犁体水平直元线法原理可知, 犁体曲面由水平直元线沿着导曲线在不同高度以不同直元线角旋转而成。在实际作业过程中, 前后犁体的作业速度、耕深及耕宽相同, 因此仿真时, 犁体曲面共用一个仿真模型, 研究固定工作参数下, 水平直元线法主要参数对犁体牵引阻力的影响规律。固定犁体的工作参数, 以犁体的主要曲面参数作为试验因素, 根据铧式犁相关原理及文献[6]相关参数推荐范围, 以犁体牵引阻力为试验目标, 选取参数 A 、 B 、 C 、 D (铧刃起土角、导曲线开度、直元线起始角、直元线最大角) 为试验因素, 进行二次回归正交旋转组合设计 EDEM 仿真试验, 分析犁体曲面不同曲面参数时的犁体牵引阻力。每种试验因素组合生成一个犁体曲面, 把犁体曲面三维模型导入 EDEM 软件中, 进行模拟仿真试验。试验因素水平编码如表 3 所示, 试验方案如表 4 所示。研究作业速度对犁体牵引阻力影响规律时, 参照文献[6]播种机高速作业范围, 选取作业速度为 $1.0 \sim 2.0 \text{ m/s}$, 以现有犁体为研究对象, 以作业速度为试验因素开展研究, 试验方案如表 5 所示。

3.2 试验条件

选取直播机开沟犁体设计工作参数, 开展仿

真试验。EDEM 仿真试验分 2 个步骤进行,先通过颗粒工厂生成颗粒形成仿真模型,然后犁体以设计工作参数开始仿真运动。对犁体进行作业速度仿真试验研究时,以现有犁体为研究对象,固定耕深为 180 mm 及耕宽为 170 mm,以不同的作业速度开展仿真试验。

表 3 试验因素水平编码

Tab. 3 Experimental values and coded levels

编码	铧刃起土	导曲线	直元线	直元线
	角 $A/(\circ)$	开度 B/mm	起始角 $C/(\circ)$	最大角 $D/(\circ)$
-1.68	15	190	35	40
-1	17	194	37	44
0	20	200	40	50
1	23	206	43	56
1.68	25	210	45	60

3.3 试验数据处理

由于犁体在开始进入及离开 EDEM 仿真模型时,犁体耕深及耕宽达不到仿真设计值,仿真数据不稳定。数据处理时,只提取符合仿真条件的数据点并取平均值,犁体曲面参数仿真结果如表 4 所示;作业速度仿真结果如表 5 所示。

表 5 作业速度仿真试验方案与结果

Tab. 5 Simulation and experimental results of operating speed operation

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
仿真值/ N	386.04	409.07	438.30	467.29	501.35	536.06	572.56	607.31	651.93	697.31

3.4 牵引阻力分析

对犁体曲面参数仿真试验结果进行响应曲面分析,如表 6 所示,回归模型为

$$y = 268.06 - 4.09a + 3.05b + 1.83c + 3.02d - 2.63ab - 2.00ad - 2.00bc + 1.01cc - 2.63cd \quad (2)$$

式中 a ——铧刃起土角编码值

b ——导曲线开度编码值

c ——直元线起始角编码值

d ——直元线最大角编码值

模型显著性检验 $F = 34.27, p < 0.001$, 决定系数 $R^2 = 0.9763$, 表明回归模型显著性,拟合程度好。

分析表 6 可得知, A 、 B 、 C 、 D 对牵引阻力具有显著影响,影响程度从大到小为 A 、 B 、 D 、 C 。4 个因素与犁体牵引阻力之间既存在二次非线性关系,也存在交互作用。从图 3 可以得出:在试验范围内,固定其中 2 个因素水平为零水平值时,牵引阻力随铧刃起土角增大而减小,而分别随导曲线开度、直元线起始角、直元线最大角增大而增大。

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Design and results of experiments

试验号	铧刃	导曲线	直元线	直元线	犁体牵引 阻力/ N
	起土角	开度	起始角	最大角	
1	1	1	1	1	266.90
2	1	1	-1	-1	259.16
3	1	-1	1	-1	264.16
4	1	-1	-1	1	263.56
5	-1	1	1	-1	269.89
6	-1	1	-1	1	280.08
7	-1	-1	1	1	271.77
8	-1	-1	-1	-1	258.82
9	-1.68	0	0	0	279.95
10	1.68	0	0	0	262.64
11	0	-1.68	0	0	261.14
12	0	1.68	0	0	275.32
13	0	0	-1.68	0	268.33
14	0	0	1.68	0	276.59
15	0	0	0	-1.68	265.64
16	0	0	0	1.68	272.13
17	0	0	0	0	266.26
18	0	0	0	0	266.26
19	0	0	0	0	266.26
20	0	0	0	0	266.26

表 6 各因素对牵引阻力影响的方差分析

Tab. 6 Variance analysis of each factor influence to traction resistance

来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
A	228.75	1	228.75	149.36	0.000 1	**
B	126.49	1	126.49	82.59	0.000 3	**
C	45.69	1	45.69	29.84	0.002 8	**
D	124.25	1	124.25	81.12	0.000 3	**
$A \times A$	4.59	1	4.59	2.99	0.144 3	
$A \times B$	55.39	1	55.39	36.17	0.001 8	**
$A \times C$	3.89	1	3.89	2.54	0.171 9	
$A \times D$	32.00	1	32.00	20.89	0.006 0	**
$B \times B$	5.66	1	5.66	3.70	0.112 4	
$B \times C$	32.00	1	32.00	20.89	0.005 9	**
$B \times D$	3.89	1	3.89	2.54	0.171 9	
$C \times C$	14.90	1	14.90	9.73	0.026 3	*
$C \times D$	55.39	1	55.39	36.17	0.001 8	**
$D \times D$	2.01	1	2.01	1.31	0.304 2	
回归	734.90	14	52.49	34.27	0.000 05	**
残差	7.66	5	1.53			
总和	742.56	19				

注: **极显著($p < 0.01$), *显著($p < 0.05$)。

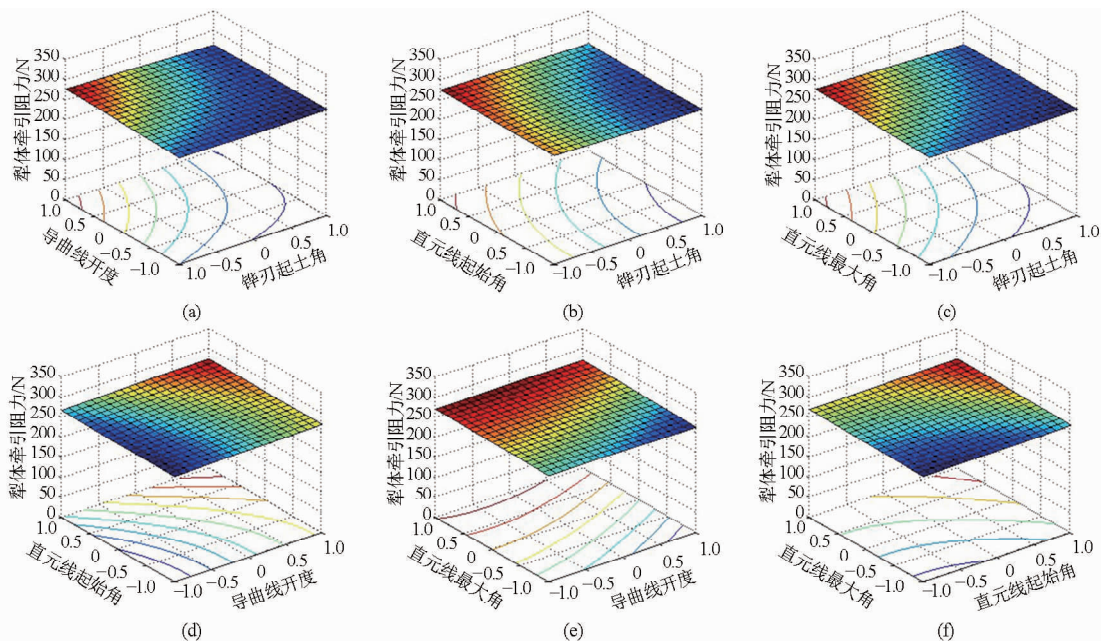


图 3 牵引阻力 F 影响因素分析

Fig. 3 Analysis result of traction resistance F

- (a) 直元线起始角、直元线最大角取中间水平值
- (b) 导曲线开度、直元线最大角取中间水平值
- (c) 导曲线开度、直元线起始角取中间水平值
- (d) 铧刃起土角、直元线最大角取中间水平值
- (e) 铧刃起土角、直元线起始角取中间水平值
- (f) 铧刃起土角、导曲线开度取中间水平值

对作业速度仿真试验结果进行分析,如表 5 及图 4 所示,图 4 曲线前半部分为本文中表 2 低速阶段 0.2 ~ 1.0 m/s 仿真结果,后半部分为高速阶段 1.0 ~ 2.0 m/s 仿真结果。可得知,在低速阶段牵引阻力呈线性增长,而高速阶段,牵引阻力呈指数增长。随着仿真作业速度从 1.0 m/s 增加到 2.0 m/s,牵引阻力从 351.31 N 增加到 697.31 N,为前者的 1.98 倍,且增幅呈逐渐增大趋势,犁体所消耗的功率从 0.35 kW 增加到 1.39 kW,为前者的 3.97 倍。表明,速度对牵引阻力影响非常明显,随着作业速度的提升,犁体牵引阻力及所消耗的功率显著增加。

3.5 结果优化

根据犁体曲面参数仿真试验结果对犁体曲面进行优化,以犁体牵引阻力最低为目标,以 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 (分别对应铧刃起土角 A 、导曲线开度 B 、直元线起始角 C 、直元线最大角 D) 为设计变量,根据回归模型及参数边界条件,建立参数优化数学模型。

目标函数

$$\min f(\mathbf{X}) = f = 268.06 - 4.09x_1 + 3.05x_2 + 1.83x_3 + 3.02x_4 - 2.63x_1x_2 - 2.00x_1x_4 - 2.00x_2x_3 + 1.01x_3x_3 - 2.63x_3x_4 \quad (3)$$

设计变量

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$$

约束条件

$$\begin{cases} g_1(\mathbf{X}) = x_1 - 15^\circ \leq 0 \\ g_2(\mathbf{X}) = 25^\circ - x_1 \leq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) = x_2 - 190 \leq 0 \\ g_4(\mathbf{X}) = 210 - x_2 \leq 0 \\ g_5(\mathbf{X}) = x_3 - 35^\circ \leq 0 \\ g_6(\mathbf{X}) = 45^\circ - x_3 \leq 0 \\ g_7(\mathbf{X}) = x_4 - 40^\circ \leq 0 \\ g_8(\mathbf{X}) = 60^\circ - x_4 \leq 0 \end{cases}$$

利用 Matlab 的 fmincon 函数进行优化求解,得出当 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 都取最小值时, f 为 241.11 N。即直播机开畦沟犁体在设计工作参数条件下,当铧刃起土角为 15° 、导曲线开度为 190 mm、直元线起始角为 35° 、直元线最大角为 40° 时,犁体牵引阻力最小

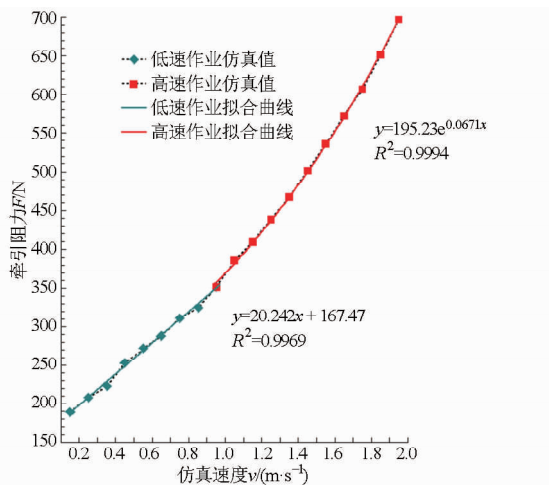


图 4 牵引阻力

Fig. 4 Traction resistance

为 241.11 N,比原有值减少 11.26%。

4 犁体设计加工与田间试验

4.1 犁体曲面 3D 打印及犁体试制加工

根据仿真试验优化结果,犁体铧刃起土角、导曲线开度、直元线起始角、直元线最大角取优化值,其他曲面参数参照现有犁体相关参数,对开畦沟系统前后犁体进行结构设计。由于后犁犁体曲面为圆柱形,且在工作过程中可以根据工况旋转,

直元线角随着改变,因此后犁直元线角取直元线角起始角零水平值,前后犁体设计参数如表 7 所示。由于犁体曲面是不规则的空间曲面,如精确制造,按传统方法需要先制作模具,冲压成型,费工耗时,成本较高。借用快速成型技术,运用 stratasys 公司生产的 SST 1200es 3D 打印机制作出前后犁体曲面塑料样件如图 5 所示,以此样件为模板,对前后犁体进行加工试制,加工出来的犁体如图 6 所示。

表 7 犁体参数

Tab.7 Parameters of plow

部件名称	耕宽 /mm	犁高 /mm	直元线角参数			导曲线参数				
			起始角	最小角	最大角	铧刃起	两端点切	导曲线直	导曲线	导曲线
			$\theta_0/(\circ)$	$\theta_{\min}/(\circ)$	$\theta_{\max}/(\circ)$	土角 $\varepsilon/(\circ)$	线夹角 $\omega/(\circ)$	线长度 s/mm	高度 h/mm	开度 L/mm
前犁	170	200	35	34	40	15	124	85	200	190
后犁	170	320	40	40	40	15	100	105	320	190

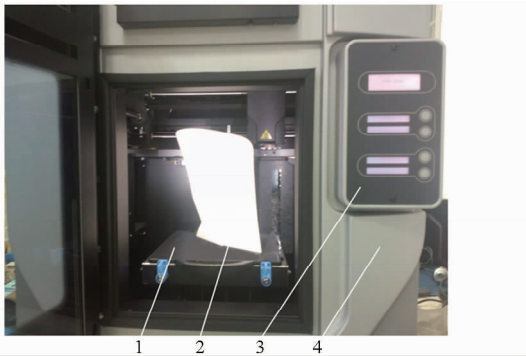


图 5 犁体曲面 3D 打印制作

Fig.5 Plow surface manufacture by 3D printer

1. 3D 打印机仓体 2. 犁体曲面 3. 控制面板 4. 3D 打印机



图 6 优化设计的前犁及后犁

Fig.6 Optimization structure of plow ahead and plow behind

1. 优化前犁 2. 优化后犁

4.2 田间试验

为考察优化设计犁体作业效果,与原型体进行田间作业对比试验。直播机一侧安装优化设计犁体,另一侧安装原有犁体。在保证每次试验耕深及耕宽相同的情况下,选取同一块适耕旱田进行田间试验。匹配动力为 62.5 kW 东方红 LX-854 型农用拖拉机,前进挡位置于慢 2 挡,速度为 2.5km/h。

田间试验土壤干基含水率 16.7%,土壤坚实度平均值 643 kPa。

分别在两侧畦沟随机取 5 处,每处长度为 200 mm,计算每处平均沟型(上底、下底及高)、沟底土壤残余质量及沟底最大块土堡高度,结果如表 8 所示,作业效果如图 7 所示,左侧为原有犁体作业效果,右侧为优化犁体作业效果。优化犁体作业出的畦沟沟底大块土堡少,残留土壤质量减少 62.87%,沟底干净,T 型沟较明显。

表 8 田间试验结果

Tab.8 Field experiment results

试验号	原有犁					优化犁				
	上底宽 /mm	下底宽 /mm	高 /mm	最大块土堡高度/mm	土壤残留量/g	上底宽 /mm	下底宽 /mm	高 /mm	最大块土堡高度/mm	土壤残留量/g
1	353.6	131.2	123.5	78.3	1 532.3	404.9	195.2	120.3	33.6	562.1
2	365.4	163.8	117.5	72.1	1 249.4	385.1	144.8	138.1	46.1	579.4
3	211.7	112.7	104.6	65.3	2 068.5	364.9	133.8	108.3	32.4	641.6
4	311.8	111.6	101.3	65.2	1 069.6	395.2	135.6	107.6	45.3	437.3
5	285.5	174.3	83.1	59.6	1 860.1	345.1	175.4	98.1	23.5	668.5
平均值	305.6	138.8	106.0	68.10	1 555.98	379.1	156.9	114.5	36.18	577.78



图 7 田间试验效果

Fig.7 Field experiment results

5 结论

(1) 建立了 EDEM 离散元仿真模型,并通过土槽试验验证其仿真模型的正确性;同时,开展了犁体曲面参数仿真试验,结果表明:铧刃起土角、导曲线开度、直元线起始角、直元线最大角等因素对牵引阻力具有显著影响,在试验范围内,牵引阻力随铧刃起土角增大而减小,而分别随导曲线开度、直元线起始角、直元线最大角增大而增大。

(2) 构建了犁体曲面参数优化数学模型,得出当铧刃起土角为 15° ,导曲线开度为 190 mm,直元线起始角为 35° ,直元线最大角为 40° 时,犁体牵引阻力最小为 241.11 N,比原有值减少 11.26%。

(3) 犁体作业速度仿真结果表明:随作业速度的增加,低速阶段其牵引阻力呈线性增长,而高速阶段其牵引阻力呈指数增长。随着仿真作业速度从 1.0 m/s 增加到 2.0 m/s,牵引阻力从 351.31 N 增加到 697.31 N,为前者的 1.98 倍,并且增幅呈逐渐增大趋势,犁体所消耗的功率从 0.35 kW 增加到 1.39 kW,为前者的 3.97 倍;表明速度对牵引阻力影响非常明显,随着作业速度的提升,犁体牵引阻力及所消耗的功率显著增加。

(4) 对前后犁体进行 3D 打印及试制加工,并开展田间对比试验,结果表明优化犁体作业出的畦沟沟底大块土堡少,残留土壤质量减少 62.87%,沟底干净,T 型沟较明显。

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.
- 张青松,汲文峰,廖庆喜,等. 油菜直播机铧式开畦沟前犁曲面分析与阻力特性试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 130-135.
Zhang Qingsong, Ji Wenfeng, Liao Qingxi, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 130-135. (in Chinese)
- 翟力欣,姬长英,丁启朔,等. 犁体结构参数与工作参数优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 57-62.
Zhai Lixin, Ji Changying, Ding Qishuo, et al. Optimized design of plow body structural and working parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 57-62. (in Chinese)
- 邱白晶,姜国微,杨宁,等. 水稻籽粒流对承载板冲击过程离散元分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 44-49.
Qiu Baijing, Jiang Guowei, Yang Ning, et al. Discrete element method analysis of impact action between rice particles and impact-board[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 44-49. (in Chinese)
- 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- 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.
- 王国强,郝万军,王继新,等. 离散元法及其 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2010.
- Mak J, Chen Y, Sadek M A. Determining parameter of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 118: 117-122.
- Martin Obermayr, Klaus Dressler, Christos Vrettos, et al. Prediction of draft forces in cohesionless soil with the discrete element method[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(5): 347-358.
- Shmulevich I. State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 111: 141-153.
- Asaf Z, Dubinstein D, Shmulevich I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97: 227-242.
- Chen Ying, Lars J Munkholm, Tavs Nyord. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 126: 34-41.
- Di Renzo Alberto, Di Maio Francesco. An improved integral non-linear model for the contact of particles in distinct element simulations[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(5): 1303-1312.
- Malone Kevin Francis, Xu Baohua. Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems[J]. Particuology, 2008, 6(6): 521-528.
- Di Renzo Alberto, Di Paolo Maio. Comparison of contact force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(3): 525-541.
- Johnson K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.