



## 基于离散元软件的大豆垄上深松铲仿真试验分析

任月鸥<sup>1</sup>, 田巍<sup>2</sup>, 朱晓刚<sup>1</sup>, 于聪梅<sup>1</sup>

(1. 长春科技学院 智能制造学院, 吉林 长春 130600; 2. 长春光华学院 电气信息学院, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 为了合理优化大豆垄上深松铲的作业性能和作业效果, 对传统大豆垄上圆弧式深松铲进行理论分析, 通过分析深松铲正常作业时的耕作阻力以及对土壤的作用确定深松铲结构参数, 并借助计算机离散元软件对深松铲进行仿真试验, 研究深松铲结构参数对于其耕作阻力及土壤扰动面积的影响, 从而优化深松铲结构。理论分析得到深松铲切削角范围为  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ , 入土角范围为  $19^{\circ} \sim 23^{\circ}$ 。2 因素 5 水平正交旋转组合离散元仿真试验得到: 影响深松铲耕作阻力的主次因素为切削角、入土角; 影响深松铲土壤扰动面积因素的主次顺序为深松铲切削角、入土角; 理论上当深松铲切削角  $34.39^{\circ}$ 、入土角  $20.24^{\circ}$  时, 耕作阻力为 804.799 N, 扰动面积为  $418.42 \text{ mm}^2$ 。验证试验结果表明, 优化后的深松铲与理论值相比, 耕作阻力增加 7.92%, 土壤扰动面积增加 7.54%, 均与理论值偏差较小, 仿真优化结果可靠。优化后的深松铲作业性能与作业效果优良, 为大豆垄上深松铲的优化设计提供一定依据。

**关键词:** 大豆; 垄上深松铲; 离散元仿真试验; 耕作阻力; 土壤扰动面积

## Simulation Analysis of Ridge Subsoiler of Soybean Based on Computer Discrete Element Software

REN Yue-ou<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>2</sup>, ZHU Xiao-gang<sup>1</sup>, YU Cong-mei<sup>1</sup>

(1. Institute of Intelligent Manufacturing, Changchun Sci-Tech University, Changchun 130600, China; 2. College of Electrical Information, Changchun Guanghua University, Changchun 130000, China)

**Abstract:** In order to optimize the performance and effect of the subsoiler which is used on the ridge, the paper took the arc-type subsoiler under the normal operation as an example to analyze the tillage resistance and the influence on soil to make sure the structure parameters of the subsoiler. Then using EDEM to do the simulation test on the subsoiler to work out how the structure parameters influenced the tillage resistance and the area of soil disturbance. In this way, the structure of the subsoiler can be optimized. Through the theoretical analysis, some parameters of the subsoiler can be made sure, for example, the range of the cutting angle was from  $30^{\circ}$  to  $60^{\circ}$  and the range of the penetration angle was from  $19^{\circ}$  to  $23^{\circ}$ . Through two-factor and five-level orthogonal rotating composite discrete element simulation test, the primary and secondary factors which influenced the tillage resistance can be found out. They were cutting angle and the penetration angle of the subsoiler. Based on the theory, when the cutting angle was  $34.39^{\circ}$  and the penetration angle was  $20.24^{\circ}$ , the tillage resistance should be 804.799 N and the disturbance area should be  $418.42 \text{ mm}^2$ . The result showed that compared with the theoretical value, the optimized tillage resistance increased by 7.92% and the soil disturbance area increased by 7.54%. It can be found that there was only slight difference between the theoretical one and the optimized one. So it proved that the optimization result was reliable. And the optimized stubble chopper had better operating performance and better operating effect. This paper can offer some basis to the optimum design for no-tillage machine parts.

**Keywords:** Soybean; Ridge subsoiler; Discrete element simulation test; Tillage resistance; Soil disturbance

大豆垄上深松铲主要的作用是打破土壤犁底层、疏松土壤, 但现有深松铲对土壤进行深松、翻垡等作业时, 土壤扰动量和耕作阻力较大, 致使土壤损墒情况严重, 同时影响深松铲的作业性能; 且大豆免耕地春季播种前和秋季收获后土壤板结现象严重, 土壤硬度大、含水量较高, 因此降低耕作阻力和土壤扰动量是对深松铲的新要求<sup>[1-3]</sup>。

近年来, 耕作阻力<sup>[4-9]</sup>和土壤扰动量<sup>[10-11]</sup>成为现在学者对于深松铲研究的主要指标。其中张金波等<sup>[12]</sup>设计了仿生深松铲, 仿照生物体形状来降低深松铲的耕作阻力, 其效果明显增强。赵淑红等<sup>[3]</sup>依据离散元软件 EDEM 中深松铲铲尖对于土壤的

作用规律, 设计了与土壤运动规律互作效应较小的深松铲铲柄, 从而降低深松铲对土壤的作用, 减小耕作阻力, 降低土壤扰动量。丘立春等<sup>[6]</sup>设计了自激振动式深松机, 以深松铲的自激振动来减小耕作阻力, 增强深松机的作业性能。刘俊安等<sup>[4]</sup>以土壤扰动量和牵引阻力的综合效果为指标, 利用面积比阻的概念对深松铲的结构参数进行优化, 得到综合效果最优时深松铲的结构参数。多数学者对深松铲研究的主要目的是减小土壤耕作阻力, 增大土壤扰动量, 深松铲土壤扰动量与耕作阻力的综合研究较少。

本研究综合深松铲土壤扰动量和耕作阻力 2 个

指标,结合计算机仿真技术优化设计大豆垄上圆弧型深松铲,针对大豆免耕地春季播种前和秋季收获后的土壤硬度大、含水量高的性质,进行垄上深松作业。以降低土壤扰动量和减小耕作阻力为目标对深松铲结构参数进行优化设计,从而降低发动机功耗、增强土壤蓄水量,为相应少免耕农机具的设计与优化提供相应的参考。

1 深松铲作业原理分析

对大豆垄上深松灭茬成垄整地机上应用的圆弧式<sup>[13]</sup>深松铲及深松铲土壤的作用进行分析。深松铲在正常作业过程中速度变化较小,因此视为匀速运动,受力均匀,并将土壤视为质点对其分析。

1.1 深松铲受力

对圆弧式深松铲刃部受力分析如图 1 所示,深松铲刃部受到土壤对其法向作用力  $F_N$ ,深松铲刃口受到土壤作用力  $F_T$ 。

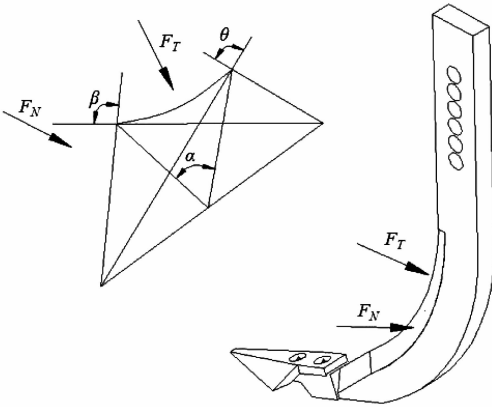


图 1 深松铲受力图

Fig. 1 Subsoiler force diagram

由图 1 可知深松铲刃部所受到的阻力是:

$$F_f = 2F_N \sin \frac{\beta}{2} + 2\mu F_N \cos \frac{\beta}{2} + F_T \quad (1)$$

式中: $\beta$ —深松铲切削角在水平面投影角, ( $^\circ$ );  
 $\mu$ —土壤对深松铲的摩擦因数。

图 1 满足:

$$\tan \frac{\beta}{2} = \tan \frac{\theta}{2} \cos \alpha \quad (2)$$

式中: $\alpha$ —深松铲切削面与水平面间的夹角, ( $^\circ$ ); $\theta$ —深松铲切削角, ( $^\circ$ )。

结合式(1)、(2)可得,田间作业时,深松铲工况视为理想状态,受力均匀,则深松铲刃部受到土壤对其法向作用力  $F_N$ ,以及深松铲刃口受到的土壤作用力  $F_T$  视为常量,其大小受工况和外界条件影响,在式(1)分析中大小不变,土壤对深松铲的摩擦因数  $\mu$  视为常量。因此深松铲在作业时受到的耕作阻力  $F_f$  受深松铲切削角在水平面投影角  $\beta$  影响。对式(1)进行推导得到:

$$F_f = 2F_N \sqrt{1 + \mu^2} \sin(\frac{\beta}{2} + \varphi) + F_T \quad (3)$$

式中: $\varphi$ —任意常量, ( $^\circ$ )。

由此可知,深松铲切削角在水平面投影角  $\beta$  越小,深松铲在作业时受到的耕作阻力  $F_f$  越小,由式(2)得,在深松铲结构参数中,深松铲切削角在水平面投影角  $\beta$  又受深松铲切削面与水平面间的夹角  $\alpha$  和深松铲切削角  $\theta$  影响,由于现有深松铲的结构中深松铲切削面与水平面间的夹角  $\alpha$ 、深松铲切削角在水平面投影角  $\beta$ 、深松铲切削角  $\theta$  都为锐角,为  $0^\circ \sim 90^\circ$ ,因此,深松铲切削角  $\theta$  越小,深松铲切削角在水平面投影角  $\beta$  越小,深松铲在作业时受到的耕作阻力  $F_f$  越小,深松铲切削面与水平面间的夹角  $\alpha$  越大,深松铲切削角在水平面投影角  $\beta$  越小,深松铲在作业时受到的耕作阻力  $F_f$  越小。传统深松铲弧度已经为较优参数,即深松铲切削面与水平面间的夹角  $\alpha$  已经确定,所以深松铲切削角  $\theta$  或深松铲切削角在水平面投影角  $\beta$  的取值直接影响深松铲在作业时受到的耕作阻力  $F_f$ ,在深松铲设计中,一般设定深松铲切削角  $\theta$ ,深松铲铲柄对于土壤的切削角范围为  $30^\circ \sim 60^\circ$ <sup>[13-14]</sup>。

1.2 土壤受力

将土壤视为质点,土壤在深松铲的作用下发生位移,以深松铲前进方向为  $x$  轴,以水平面上垂直于前进方向为  $y$  轴,铅锤方向为  $z$  轴,土壤质点  $P$  受力如图 2 所示。 $N$  为土壤受到周围土壤的支持力, $G$  为土壤所受的重力, $F_n$  为深松铲对土壤的法向作用力, $F_\tau$  为深松铲对土壤的切向作用力, $f$  为土壤受到周围土壤的摩擦力。

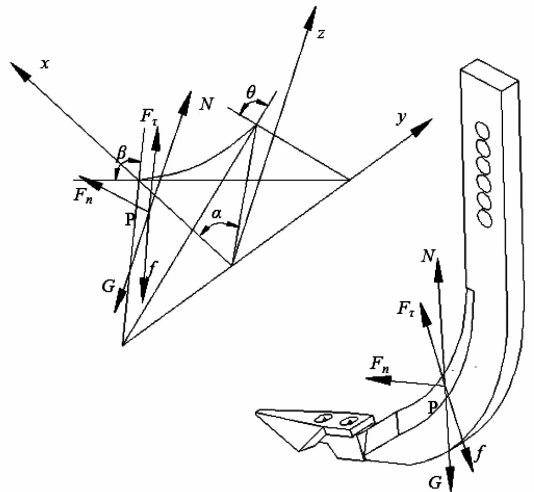


图 2 P 质点的受力分析模型

Fig. 2 The force analysis model of P particle

铅锤方向两个力平衡,对于土壤质点建立微分方程:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_n \cos \gamma \sin \frac{\beta}{2} + F_\tau \cos \frac{\beta}{2} - f \cos \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = F_{\tau} \sin \frac{\beta}{2} - f \sin \frac{\beta}{2} - F_n \cos \gamma \cos \frac{\beta}{2} \quad (5)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = F_n \sin \gamma + N - G \quad (6)$$

式中:γ—深松铲对土壤的法向作用力与水平面间的夹角,°;m—土壤质点的质量,kg。

其中:  $F_{\tau} = \mu F_n$  (7)

式(4)、(5)、(6)对时间求解两次积分得到,土壤质点 P 在 x 轴、y 轴、z 轴方向的位移方程(8)、(9)、(10)如下:

$$X = \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} t^2 (F_n \cos \gamma \sin \frac{\beta}{2} + F_{\tau} \cos \frac{\beta}{2} - f \cos \frac{\beta}{2}) + C t + C_1 \right] \quad (8)$$

$$Y = \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} t^2 (F_{\tau} \sin \frac{\beta}{2} - f \sin \frac{\beta}{2} - F_n \cos \gamma \cos \frac{\beta}{2}) + C_2 t + C_3 \right] \quad (9)$$

$$Z = \frac{1}{m} \left[ \frac{1}{2} t^2 (F_n \sin \gamma + N - G) + C_4 + C_5 \right] \quad (10)$$

式中:X—土壤在 x 轴方向的位移,m;Y—土壤在 y 轴方向的位移,m;Z—土壤在 z 轴方向的位移,m;C、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>5</sub>—积分常数。

则土壤质点 P 的总位移为:

$$S = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (11)$$

式(8)、(9)、(10)、(11)中,深松作业速度一定时,土壤受到周围土壤的支持力 N,土壤所受的重力 G,深松铲对土壤的法向作用力 F<sub>n</sub>,深松铲对土壤的切向作用力 F<sub>τ</sub>,土壤受到周围土壤的摩擦力 f,以及 C 和 C<sub>1</sub>~C<sub>5</sub> 均视为常数,深松铲对土壤的法向作用力与水平面间的夹角 γ 在深松铲弧度一定时,与深松铲的入土角有关。因此,土壤在空间上的总位移与深松铲的入土角和切削角在水平面投影角 β 有关,即切削角,切削角越小,土壤扰动量越小。切削角与深松铲受力分析中取值范围相同,耕作阻力较小时,入土角一般为 19°~23°<sup>[4]</sup>。

2 仿真试验

为优化深松铲结构参数,在 EDEM 软件中对深松铲进行仿真试验,探究理论分析中各因素对深松铲作业性能耕作阻力及作业效果土壤扰动量的影响,并确定最优参数组合。

2.1 方法

2.1.1 因素确定 在深松铲弧度一定时,深松铲切削角和入土角是决定深松铲作业性能与作业效果的主要结构参数,因此以深松铲切削角 x<sub>1</sub>、入土角 x<sub>2</sub> 为试验因素。以深松铲耕作阻力 Y<sub>1</sub> 和土壤扰动面积 Y<sub>2</sub><sup>[15]</sup> 为评价指标,采用 2 因素 5 水平正交旋转组合试验方法<sup>[16]</sup>,共实施 13 组试验。

2.1.2 水平确定 由深松铲受力与土壤受力分析

得,所选各因素水平范围分别为:切削角 x<sub>1</sub> (30°~60°)、入土角 x<sub>2</sub> (19°~23°),确定本次离散元仿真试验的试验因素以及试验水平编码表<sup>[17]</sup> (表 1)

表 1 因素水平编码表

Table 1 Factor level coding table		
编码值 Encoding value	因素 Factor	
	x <sub>1</sub> /°	x <sub>2</sub> /°
1.414	30.00	19.00
1	34.39	19.59
0	45.00	21.00
-1	55.61	22.41
-1.414	60.00	23.00

2.1.3 评价指标测定方法 耕作阻力是评价深松铲的重要指标,仿真时,输出深松铲阻力,并剔除其不合理值,计算平均值即可得到评价指标 Y<sub>1</sub>。

仿真试验结束后,在 EDEM 软件中随机选取作业过程中的 5 组沟形截面,测量其横截面积并计算平均值 Y<sub>2</sub>。

2.2 仿真模型

为保证深松铲有充足的作业范围,设置长 600 mm、宽 350 mm、高 400 mm 的仿真模型,如图 3 所示。在 Catia 软件中进行深松铲三维绘图,如图 4 所示,保存为 igs 格式并导入 EDEM 软件中。材料为 65 Mn,密度为 7 850 kg·m<sup>-3</sup>,剪切模量为 7.546 × 10<sup>10</sup> Pa,泊松比为 0.3。

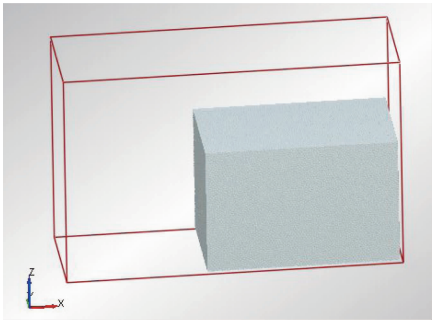


图 3 仿真模型  
Fig. 3 Simulation model



图 4 深松铲形状图  
Fig. 4 Chart of subsoiler

2.3 土壤模型与土壤接触模型的建立

本文在 EDEM 软件中选用单一小球颗粒模型模拟实际土壤颗粒。经查阅土壤中颗粒半径为 4 mm 的土壤颗粒占的百分比最大<sup>[17]</sup>,设置小球颗粒半径为 4 mm,填满整个仿真模型。

依据离散元法的力学基础<sup>[18-19]</sup>以及壤土的性质,土壤颗粒与深松铲之间设定为 Hertz-Mindlin (no slip) 接触模型,土壤颗粒与土壤添加 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型<sup>[18-21]</sup>。

2.4 运动设定

深松铲前进速度设定为与垄上深松灭茬机正常作业相近的 1 m·s<sup>-1</sup>,沿 x 轴负向运动,在 EDEM 后处理模块中对仿真结果进行输出,仿真图如图 5 所示。

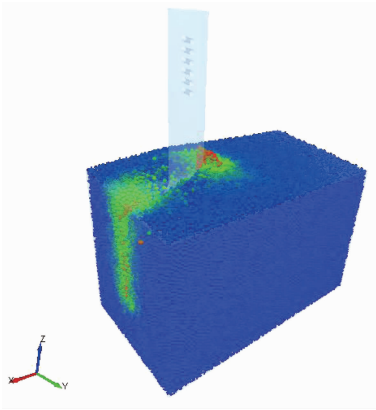


图5 深松铲作业仿真图

Fig. 5 Simulation of subsoiler

3 离散元仿真结果与分析

应用 Design-Expert 8. 0. 6,采用2因素5水平二次回归正交旋转组合设计多因素优化虚拟试验方案。每组试验重复3次,试验结束后输出深松铲的耕作阻力并测量试验沟形扰动面积,其它各项参数

保持恒定,取平均值作为试验结果。具体试验方案与结果如表 2 所示。

表2 仿真试验方案与试验结果

Table 2 Schemes and results of tests

序号 No.	试验因素 Experiment factors		性能指标 Performance index	
	$x_1$	$x_2$	$Y_1/N$	$Y_2/mm^2$
1	-1	-1	838. 100	441. 105
2	1	-1	1802. 000	948. 421
3	-1	1	1269. 350	668. 079
4	1	1	1907. 600	1004. 000
5	-1414	0	630. 950	332. 079
6	1. 414	0	2052. 900	1080. 470
7	0	-1. 414	1458. 450	767. 605
8	0	1. 414	1810. 400	952. 842
9	0	0	1350. 700	705. 895
10	0	0	1327. 250	694. 553
11	0	0	1254. 050	660. 026
12	0	0	1353. 050	702. 132
13	0	0	1363. 550	687. 658

$x_1$ : 切削角;  $x_2$ : 入土角;  $Y_1$ : 耕作阻力;  $Y_2$ : 扰动面积。  
 $x_1$ : Cutting angle;  $x_2$ : Penetrating angle;  $Y_1$ : Tillage resistance;  $Y_2$ : Disturbed area.

3.1  $Y_1$  回归模型与显著性检验

深松铲耕作阻力  $Y_1$  方差分析如表 3 所示。由表 3 可知,对于耕作阻力  $Y_1$ ,影响的耕作阻力  $Y_1$  主次因素顺序是切削角  $x_1$ 、入土角的二次项  $x_2^2$ 、入土角  $x_2$ 、切削角与入土角的交互项  $x_1x_2$ 、切削角的二次项  $x_1^2$ ,切削角  $x_1$ 、入土角的二次项  $x_2^2$ 、入土角  $x_2$  对耕作阻力  $Y_1$  的影响极显著 ( $P < 0. 01$ ); 切削角与入土角的交互项  $x_1x_2$  对功耗  $Y_1$  的影响显著 ( $0. 01 < P < 0. 05$ ),得到各因素对耕作阻力  $Y_1$  影响的回归方程为:

$$Y_1 = 1328. 07 + 451. 64x_1 + 129. 32x_2 - 81. 41x_1x_2 + 144. 18x_2^2$$

(12)

表3 耕作阻力  $Y_1$  方差分析

Table 3 Variance analysis of tillage resistance  $Y_1$

变异来源		平方和	自由度	均方	F 值	P 值
Variation source		Sum of squares	Freedom	Mean square	F value	P value
模型 Model		1. 939e + 006/1. 939e + 006	5/4	3. 879e + 005/4. 848e + 005	86. 9/123. 99	<0. 0001 * * / <0. 0001 * *
$x_1$		1. 632e + 006/1. 632e + 006	1/1	1. 632e + 006/1. 632e + 006	356. 63/417. 34	<0. 0001 * * / <0. 0001 * *
$x_2$		1. 338e + 005/1. 338e + 005	1/1	1. 338e + 005/1. 338e + 005	29. 98/34. 22	0. 0009 * * /0. 0004 * *
$x_1x_2$		26511. 98/26511. 98	1/1	26511. 98/26511. 98	5. 94/6. 78	0. 0449 * /0. 0314 *
$x_1^2$		39. 26	1	39. 26	8. 797e-003	0. 9279
$x_2^2$		1. 44e + 005/1. 471e + 005	1/1	1. 44e + 005/1. 471e + 005	32. 26/37. 63	0. 0008 * * /0. 0003 * *
残差 Residual	失拟差 Lack of fit	23380. 15/23419. 41	3/4	7793. 38/5854. 85	3. 97/2. 98	0. 1082/0. 1577
	误差 Pure error	7860. 97/7860. 97	4/4	1965. 24/1965. 24		
总和 Sum		1. 971e + 006/1. 971e + 006	12/12			

斜线后面为去除不显著项后  $Y_1$  方差分析结果; \*\* 表示极显著 ( $P \leq 0. 01$ ); \* 表示显著 ( $0. 01 < P \leq 0. 05$ )。下同。  
Behind the slash is the analysis of  $Y_1$  variance results without significant factors; \*\* means very significant ( $P \leq 0. 01$ ); \* means significant ( $0. 01 < P \leq 0. 05$ ). The same bellow.

3.2 Y<sub>2</sub> 回归模型与显著性检验

影响 Y<sub>2</sub> 的因素主次顺序是切削角 x<sub>1</sub>、入土角的二次项 x<sub>2</sub><sup>2</sup>、入土角 x<sub>2</sub>、切削角与入土角的交互项 x<sub>1</sub>x<sub>2</sub>、切削角的二次项 x<sub>1</sub><sup>2</sup>,切削角 x<sub>1</sub>、入土角的二次项 x<sub>2</sub><sup>2</sup>、入土角 x<sub>2</sub> 对 Y<sub>2</sub> 的影响极显著 (P < 0. 01); 切削角与入土角的交互项 x<sub>1</sub>x<sub>2</sub> 对 Y<sub>2</sub> 的影响显著

(0. 01 < P < 0. 05)。将切削角的二次项 x<sub>2</sub><sup>2</sup> 去除后进行方差分析,结果如表 4 所示。得到切削角 x<sub>1</sub>、入土角的二次项 x<sub>2</sub><sup>2</sup>、入土角 x<sub>2</sub>、切削角与入土角的交互项 x<sub>1</sub>x<sub>2</sub> 对 Y<sub>2</sub> 影响的回归方程为:

$$Y_2 = 692.59 + 237.7x_1 + 68.06x_2 - 42.85x_1x_2 + 80.15x_2^2$$

(13)

表 4 扰动面积 Y<sub>2</sub> 方差分析表  
Table 4 Variance analysis table of soil disturbance Y<sub>2</sub>

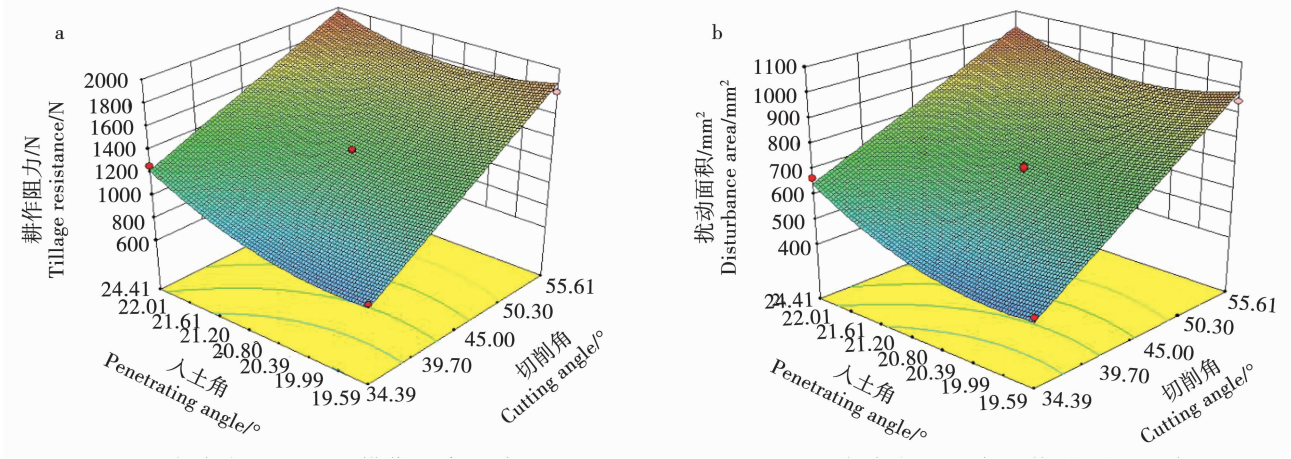
变异来源		平方和	自由度	均方	F 值	P 值
Variation source		Sum of squares	Freedom	Mean square	F value	P value
模型 Model		5. 42e +005/5. 419e +005	5/4	1. 084e +005/1. 355e +005	97. 27/137. 3	<0. 0001 * * / <0. 0001 * *
$x_1$		4. 52 +005/4. 52 +005	1/1	4. 52 +005/4. 52 +005	405. 61/458. 12	<0. 0001 * * / <0. 0001 * *
$x_2$		37062. 36/37062. 36	1/1	37062. 36/37062. 36	33. 26/37. 56	0. 0007 * * /0. 0003 * *
$x_1x_2$		7344. 04/7344. 04	1/1	7344. 04/7344. 04	6. 59/7. 44	0. 0372 * /0. 0259 *
$x_1^2$		92. 66	1	92. 66	0. 083	0. 7814
$x_2^2$		45218. 13/45459. 15	1/1	45218. 13/45459. 15	40. 58/46. 07	0. 0004 * * /0. 0001 * *
残差	失拟差	6476. 49/6569. 15	3/4	2158. 83/1642. 29	6. 52/4. 96	0. 0509/0. 075
Residual	Lack of fit					
误差		1324. 46/1324. 46	4/4	331. 11/331. 11		
Pure error						
总和 Sum		5. 498e +005/5. 498e +005	12/12			

3.3 交互作用分析

得到切削角 x<sub>1</sub>、入土角 x<sub>2</sub> 之间显著交互作用对耕作阻力 Y<sub>1</sub> 及扰动面积 Y<sub>2</sub> 的响应曲面,如图 6 所示。

对于耕作阻力 Y<sub>1</sub>,切削角与入土角的交互作用响应曲面如图 6a 所示,耕作阻力 Y<sub>1</sub> 随着切削角的增大而呈现增大趋势,最优的切削角为 34.39°~45.00°,原因是随着切削角减小,深松铲刃口越锋利,在深松铲作业过程中,深松铲刃部与土壤的接

触面积减小,因此深松铲的耕作阻力较低;耕作阻力 Y<sub>1</sub> 随着入土角的增加呈现先减小后增大的趋势,最优的入土角为 19.99°~21.61°,原因是当入土角增大时,深松铲的入土能力增强,但深松铲作业时与土壤的接触面积增大,因此过大的入土角会使耕作阻力增大,但过小的入土角会增加深松铲的入土难度,因此作业过程中阻力也会增大;在切削角与入土角的交互作用中,主要影响耕作阻力 Y<sub>1</sub> 的因素是切削角。



a. 切削角与入土角对耕作阻力影响; b. 切削角与入土角对扰动面积影响。  
a. Effect of cutting angle and penetrating angle on tillage resistance; b. Effect of cutting angle and penetrating angle on disturbed area.

图 6 深松铲仿真试验响应曲面分析  
Fig. 6 Response surface analysis about the simulation experiment of subsoiler



对于扰动面积  $Y_2$ , 切削角与入土角的交互作用响应曲面如图 6b 所示, 扰动面积  $Y_2$  随着切削角的增大而呈现增大趋势, 最优的切削角为  $34.39^\circ \sim 45.00^\circ$ , 原因是随着切削角减小, 深松铲作业时刃部与土壤的接触面积减小, 与土壤的相互作用减弱, 对土壤的推动减小, 土壤扰动面积减小, 因此呈现出随着切削角的增大而增大的趋势; 扰动面积  $Y_2$  随着入土角的增加呈现先减小后增大的趋势, 最优的入土角为  $19.99^\circ \sim 22.01^\circ$ , 原因是过大的入土角, 会使深松铲作业时与土壤的接触面积增大, 从而增强深松铲与土壤的相互作用, 增加土壤扰动量, 较小的人土角增加深松铲入土难度, 在深入土壤时与土壤的相互作用较强, 增加土壤扰动量; 在切削角与入土角的交互作用中, 主要影响扰动面积  $Y_2$  的因素是切削角。

3.4 参数优化

对响应曲面的最优区域进行求解, 当耕作阻力及土壤扰动面积两指标综合最优时, 约束深松铲切削角与入土角最优范围为:

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \min Y_1(x_1, x_2) \\ \min Y_2(x_1, x_2) \end{cases} \quad (14) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} 34.39^\circ \leq x_1 \leq 45^\circ \\ 19.99^\circ \leq x_2 \leq 22.01^\circ \end{cases} \end{aligned}$$

对其参数进行求解, 参数优化结果为: 深松铲切削角  $34.39^\circ$ 、入土角  $20.24^\circ$ , 此时理论上深松铲耕作阻力为  $804.799\text{ N}$ , 扰动面积为  $418.42\text{ mm}^2$ 。

3.5 仿真验证试验

选取上述优化的深松铲结构参数在 CATIA 中建立模型, 保存为 stp 格式并导入 EDEM 软件中进行仿真验证试验, 相同条件下重复试验 3 次, 得到深松铲平均耕作阻力为  $868.56\text{ N}$ , 平均土壤扰动面积为  $449.973\text{ mm}^2$ 。

由仿真验证试验可知, 深松铲在优化结构参数作业时, 深松铲耕作阻力和理论值相比增加  $7.92\%$ , 土壤扰动面积和理论值相比增加  $7.54\%$ , 验证试验值与理论值差异较小, 因此多因素优化试验结果可靠性较强。

4 讨论

由仿真试验结果可知, 耕作阻力随着切削刃角的增大而增大, 这与赵淑红等<sup>[3]</sup>的研究结果相同, 主要原因是随着切削刃角的减小, 深松铲刃部与土壤的接触面积减小, 深松铲刃部对土壤的压强增大, 对土壤的破坏能力增强。耕作阻力随着入土角的增大先减小后增大, 与刘俊安等<sup>[4]</sup>的研究结果类似, 可能原因是过大的入土角增加铲尖与土壤的接触面积, 较小的人土角使深松铲难以入土, 因此需

要适宜的入土角。

本次离散元仿真输出的深松铲耕作阻力较田间试验中的耕作阻力偏小, 可能原因是田间条件较复杂, 土壤的理化呈现多样性, 而在离散元仿真中仅对土壤的主要物理参数进行设置, 忽略了田间土壤中微生物、无机物等生化物质对深松作业的影响。于建群等<sup>[21]</sup>、赵淑红等<sup>[22]</sup>的研究结果中离散元仿真结果也小于试验结果。但本次仿真试验的趋势与田间中的趋势一致。在后期的研究中将运用 C 语言对弹性函数进行编译, 通过 EDEM 软件的应用编程接口 (API, application programming interface) 进行软件二次开发, 使其更精准地建立离散元仿真模型, 以保证耕整地部件模拟仿真试验与田间试验更加吻合。本研究未进行田间试验, 所研究数据仅与学者田间试验中的研究结果进行对比, 在此方面还存在缺陷, 后期会进一步完善, 进行田间验证及田间对比试验。

5 结论

(1) 对深松铲作业时受到的耕作阻力与深松铲对土壤的作用进行理论分析, 得到影响深松铲耕作阻力与土壤扰动量的物理量为切削角、入土角。

(2) 耕作阻力随着深松铲的切削角增大而增大, 随着入土角的增大呈现先增大后减小的趋势, 土壤扰动面积随切削角的增加而增大, 随着入土角的增加呈现先增大后减小的趋势; 深松铲切削角  $34.39^\circ$ 、入土角  $20.24^\circ$  时, 理论上深松铲耕作阻力为  $804.799\text{ N}$ , 扰动面积为  $418.42\text{ mm}^2$ 。

(3) 验证试验得到深松铲切削角  $34.39^\circ$ 、入土角  $20.24^\circ$  时, 深松铲平均耕作阻力为  $868.56\text{ N}$ , 平均土壤扰动面积为  $449.973\text{ mm}^2$ , 耕作阻力和理论值相比增加  $7.92\%$ , 土壤扰动面积和理论值相比增加  $7.54\%$ , 均与优化结果理论值相差较小, 因此离散元仿真优化试验结果可靠。

参考文献

[1] 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与松土效果研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014. (Wang Y. Simulation analysis of structure and effect of the subsoiler based on DEM[D]. Changchun: Jinlin Agricultural University, 2014.)

[2] 龚皓晖. 基于土壤力学模型的深松铲有限元分析与结构优化[D]. 成都: 西华大学, 2013. (Gong H H. Finite element analysis and structure optimization for subsoiling shovel based on soil mechanics model[D]. Cengdu: Xihua University, 2013.)

[3] 赵淑红, 王加一, 陈君执, 等. 保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 82-92. (Zhao S H, Wang J Y, Chen J Z, et al. Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 82-92.)

- [4] 刘俊安, 王晓燕, 李洪文, 等. 基于土壤扰动与牵引阻力的深松铲结构参数优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 60-67. (Liu J A, Wang X Y, Li H W, et al. Optimization of structural parameters of subsoiler based on soil disturbance and traction resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 60-67.)
- [5] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62-72. (Zheng K, He J, Li H W, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62-72.)
- [6] 邱立春, 李宝筏. 自激振动深松机减阻试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 72-76. (Qiu L C, Li B F. Experimental study on the self-excited vibration subsoiler for reducing draft force [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6): 72-76.)
- [7] Shangolia G, Fielke J, Saunders C, et al. Simulation of the dynamic behaviour of a tractor-oscillating subsoiler system[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2): 147-155.
- [8] 李霞, 付俊峰, 张东兴, 等. 基于振动减阻原理的深松机牵引阻力试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 32-36. (Li X, Fu J F, Zhang D X, et al. Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 32-36.)
- [9] 张强, 张璐, 刘宪军, 等. 基于有限元法的仿生钩形深松铲耕作阻力[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(增刊1): 117-121. (Zhang Q, Zhang L, Liu X J, et al. Soil resistance of the bionic hook-shape subsoiler based on the finite element method [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(S1): 117-131.)
- [10] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80-88. (Huang Y X, Hang C G, Yuan M C, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80-88.)
- [11] 丁启朔, 任骏, Belal E A, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38-48. (Ding Q S, Ren J, Belal E A, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38-48.)
- [12] 张金波, 佟金, 马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 141-145. (Zhang J B, Tong J, Ma Y H. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141-145.)
- [13] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. (China Research Institute of Agricultural Mechanization. Agricultural machinery design manual [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 2007.)
- [14] 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1990. (Zeng D C. Mechanical soil dynamics [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 1990.)
- [15] Hasimu A, Ying C. Soil disturbance and draft force of selected seed openers [J]. Soil & Tillage Research, 2014, 140(6): 48-54.
- [16] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. (He W, Xue W D, Tang B. Optimization test design method and data processing [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2012.)
- [17] 曹秀振. 基于离散元法的免耕播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. (Cao X Z. Design and test of no-till seeding opener on discrete element method [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.)
- [18] 胡建平, 周春健, 侯冲, 等. 磁吸板式排种器充种性能离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 94-98. (Hu J P, Zhou C J, Hou C, et al. Simulation analysis of seed-filling performance of magnetic plate seed-metering device by discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 94-98.)
- [19] 韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 等. 颗粒滚动摩擦系数对堆积特性的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 165-171. (Han Y L, Jia F G, Tang Y R, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 165-171.)
- [20] Mustafa U, John M F, Chris S. Three dimensional discrete element modeling DEM of tillage accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298-306.
- [21] 于建群, 钱立彬, 于文静, 等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 53-57. (Yu J Q, Qian L B, Yu W J, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53-58.)
- [22] 赵淑红, 刘宏俊, 谭贺文, 等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 32-39. (Zhao S H, Liu H J, Tan H W, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 32-39.)