

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2019.12.001

基于离散元法立式螺旋开沟器开沟质量的评价^①

杨文敏^{1,2,3}, 邬备^{1,2}, 彭智¹, 谭世伟¹

1. 湖南农业大学工学院, 长沙 410128; 2. 湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 长沙 410128;
3. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128

摘要: 为了定量评价立式螺旋开沟器的开沟质量, 构建立式螺旋开沟器与土壤相互作用的三维离散元模型, 土壤颗粒之间选用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型, 以转速 180 r/min、前进速度 0.027 m/s 模拟开沟 1.88 m, 利用 EDEM 软件 Analyst 模块中的标尺、查询等工具对开沟质量指标进行定量测定, 结果表明沟型整齐, 平均开沟宽度 29.4 cm, 平均开沟深度 31.7 cm, 开沟深度稳定性为 87.32%, 沟底浮土 6.924 kg/m, 直观给出沟两侧抛土量的分布图. 开沟质量符合《田间开沟机械作业质量》(NY/T 740-2003)的要求, 为立式螺旋开沟器的参数优化奠定了基础.

关键词: 开沟器; 立式螺旋; 作业质量; 离散元法; EDEM

中图分类号: S222.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2019)12-0001-07

开沟机是以旋转刀具开挖排灌沟、施肥沟的农田水利机械, 其形式有犁铧式、圆盘式、链齿式、螺旋式等, 其中立式螺旋开沟机集切削、提升、抛撒于一体, 已成为农业机械化生产中的主要机种之一^[1], 立式螺旋开沟器是其主要工作部件. 有学者重点考察其切削土壤的功耗, 吕正洋提出了功耗的计算公式^[2]; 邓洪超、李婧建立了最小功耗和最大生产率的数学模型, 优化了螺旋角并进行了验证性试验^[3]; 张泉泉等设计了一套试验装置, 测定了立式螺旋开沟器在土槽中的功耗, 在给定试验条件下切削功耗与理论值的误差最大为 11.05%^[4]. 与此同时, 数值模拟法也逐渐被应用于开沟部件土壤切削性能的研究. 夏俊芳等^[5]、薛子萱等^[6]利用有限元法模拟了立式螺旋开沟器的土壤切削性能; 陈睿等^[7]采用 SPH 法模拟开沟器切削土壤的过程, 对切削土壤过程的功耗进行了分析. 前述这些研究, 均以降低螺旋刀具切削土壤的功耗为目的, 由于研究方法和手段的限制, 对开沟质量定性分析较多, 定量分析较少. 根据 NY/T740-2003《田间开沟机械作业质量》标准, 开沟过程中沟型及其尺寸、沟底浮土厚度和抛土均匀性等是评定开沟质量的主要指标. 离散元法在土壤耕作动力学中已得到广泛应用^[8-11], 本文采用离散元分析软件 EDEM 对立式螺旋开沟器的开沟过程进行模拟, 并对开沟质量指标进行定量测定.

1 立式螺旋开沟器的结构与主要参数

1.1 结构及工作原理

立式螺旋开沟器主要由清沟铲 1、刀轴 2、螺旋叶片 3、挡土板 4 等组成(图 1). 田间作业时, 一般与拖拉机配套使用, 动力经拖拉机动力输出轴输出, 经齿轮减速器减速后, 带动螺旋刀轴转动切削土壤,

① 收稿日期: 2019-01-20

基金项目: 湖南省政府重大专项(湘府阅[2014]35号); 湖南省科技厅平台建设项目(湘财教指[2014]10号).

作者简介: 杨文敏(1968-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事农业机械创新设计及其 CAE.

前进速度由拖拉机控制。土壤在螺旋刀具的弯曲、挤压、剪切等联合作用下,产生塑性失效破碎为土壤颗粒^[12],再沿螺旋面升运到畦面。

1.2 主要结构参数

为了用于果园施肥沟的开沟,本项目设计的立式螺旋开沟器为圆柱螺旋开沟器。为了避免土壤在输送过程中在上下叶片之间发生堵塞和挤压,螺旋叶片的导程设计为变导程,自下而上连续增大;叶片的几何形状使被切下的土块沿叶片轴向输送,而不随叶片的旋转而原地打转。螺旋刀具的螺旋叶片为变螺距圆柱正螺旋面,变导程螺旋线参数方程为^[13]

$$\begin{cases} x = r \cos(t \cdot k \cdot 360) \\ y = r \sin(t \cdot k \cdot 360) \\ z = (H - 2\pi \cdot k \cdot r \cdot \tan\beta)t^2 + (2\pi \cdot k \cdot r \cdot \tan\beta)t \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, r 为叶片半径; k 为螺旋线上升圈数; H 为上升高度; β 为初始螺旋角; t 为变量, $0 < t < 1$ 。螺旋开沟器其主要结构参数见表 1。

表 1 螺旋开沟器主要结构参数

参数	主轴内径/mm	主轴外径/mm	主轴高度/mm	螺旋外径/mm	螺旋角	螺旋线上升圈数	叶片厚度/mm	螺旋高度/mm	螺旋外沿与挡土板间隙/mm
值	44	60	650	200	25°	4	3	550	20

2 材料与方法

2.1 接触模型

果园土壤板结严重,含水率不高,故本研究采用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型^[14-15]。在该模型中的颗粒之间的粘结键可承受切向和法向位移,直至达到最大的法向正应力 σ_{\max} 和切向剪切应力 τ_{\max} ,粘结键断裂,因此,常用来模拟破碎工况。颗粒在粘结时刻之前,颗粒间的相互作用通过标准的 Hertz-Mindlin 接触模型计算,粘结以后,颗粒上的力/力矩被设置为零,并在每个时间步进行逐步调整,当法向和切向剪切应力超过预设的值时,粘结键破裂。此后,颗粒被视作硬球进行接触求解。

$$\sigma_{\max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J}R_B \quad (2)$$

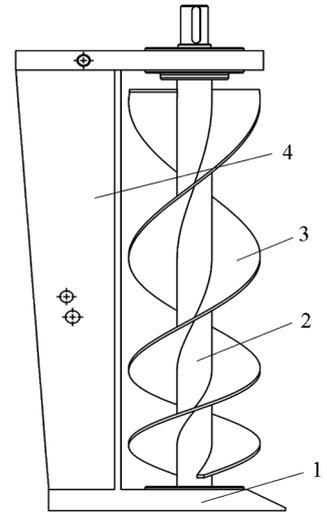
$$\tau_{\max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J}R_B \quad (3)$$

其中, A 为接触面积 $A = \pi R_B^2$, J 为惯性矩 $J = \frac{1}{2}\pi R_B^2$, R_B 为粘结键的半径, F_n, F_t 为颗粒间法向接触力和切向接触力, M_n, M_t 为颗粒间受到的法向力矩和切向力矩。

2.2 土壤参数标定

离散元仿真参数主要分为材料参数和接触参数两大类,其中材料参数包括土壤、螺旋叶片和挡土板的密度、泊松比和剪切模量等;接触参数包括土壤—土壤、土壤—螺旋刀、土壤—挡土板之间的静摩擦系数、滚动摩擦系数和恢复系数等。

通过堆积试验测得标定土样的堆积角平均值为 40.95° ,在 EDEM 中按 1:1 的比例建立堆积角试验装置的几何模型,先按照 GEMM(Generic EDEM material model database)数据库初定颗粒之间的接触参数,按照和物理试验相同的颗粒大小、密度和配比生成颗粒,采用最陡爬坡试验结果标定土壤颗粒之间静摩擦系数、动摩擦系数和恢复系数^[16]。其他参数参照文献[9]和文献[14]选取(表 2)。



1. 清沟铲; 2. 刀轴;
3. 螺旋叶片; 4. 挡土板。

图 1 开沟器的结构图

表 2 离散元模型基本参数

参数	土壤颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	土壤颗粒 泊松比	土壤剪切模 量/Pa	65Mn 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	65Mn 泊松比	65Mn 剪 切模量/Pa	土粒-土粒 恢复系数	土粒-土粒静 摩擦系数 f_1
值	2 670	0.38	1e+6	7 800	0.3	3.55e+7	0.5	550
参数	土粒-土粒动 摩擦系数	土粒-65Mn 恢复系数	土粒-65Mn 静 摩擦系数 f_2	土粒-65Mn 动 摩擦系数	法向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	切向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)	法向应变/ Pa	粘结半径/ mm
值	0.1	0.5	0.4	0.1	5e+7	6e+7	3e+5	11

2.3 建立离散元仿真模型

建立长 2 m、宽 1 m、深 1 m 的虚拟土槽, 虚拟土槽槽壁材料为 Q235 钢, 土壤颗粒为单一球面颗粒, 半径分别为 25, 10, 5 mm, 按照颗粒体积配比为 9%, 76%, 15%。采用动态生成法以 5 000 kg/s 的速率生成 3 204 kg。为便于快速下落, 在 $-y$ 方向施予 0.1 m/s 的初速度, 运行计算 3 s, 共计生成土壤颗粒 739 222 粒。在 Analyst 模块下将仿真结果文件以新文件名输出, 作为后续模拟开沟的虚拟土槽。

用 Pro/E 软件创建立式螺旋开沟器的几何模型, 装配体的坐标原点设置在螺旋刀下端部中心位置, 另存为 STL 类型文件, 导入到上述虚拟土槽中, 设定 $-x$ 方向为进刀方向, $-y$ 方向为沟深方向, z 方向为沟宽的方向, 并且将开沟器的原点置于点(1 050, 400, 500)处。

立式螺旋刀的转速、前进速度对开沟的功耗以及抛土性能有显著影响, 转速值的取值必须大于土壤颗粒升运的临界转速^[3], 经计算得到该螺旋开沟器的土粒升运的临界转速为 164 r/min, 作为一个算例, 螺旋刀具的前进速度取 180 r/min。在一定的土壤模型条件下, 螺旋开沟器前进速度与功耗总量呈正比, 设计时根据发动机的功率取上限^[2]。本螺旋开沟器配套动力为 175F 柴油机(4.5 kW), 螺旋刀具的前进速度参考文献[5]取 0.027 m/s。给螺旋刀具添加旋转运动和进刀运动, 转速和进给量分别为 180 r/min 和 0.027 m/s; 同时给挡土板添加水平移动, 速度为 0.027 m/s。挡土板和螺旋刀具没有相对移动, 螺旋刀具和挡土板一起组成开沟器, 以此模拟开沟工况。为了提高仿真计算速度, 设置一个动态计算域附着在开沟器上, 和开沟器与相同的速度进给, 其大小为 $x=600$ mm、 $y=700$ mm、 $z=600$ mm。设置 Rayleigh 时间步为 5%, cell 网格大小设为 $3R_{\min}$, 设置仿真时间 69.62 s, 运行仿真, 螺旋开沟器开出 1.88 m 长的深沟。

2.4 开沟质量指标及其测定方法

按照《田间开沟机械作业质量》(NY/T740-2003)规定的评价指标及其检验方法, 主要检验沟型、开沟深度及其稳定性、沟面宽度及其稳定性、沟底浮土厚度及抛土均匀性等指标。本文所述立式螺旋开沟器开出的沟型为矩形沟, 沟形完整, 沟壁较整齐(图 2)。

2.4.1 开沟深度及宽度

开沟深度是指地面至沟底面之间的垂直距离。开沟宽度分为沟面宽度和沟底宽度, 由于是矩形沟仅测量沟面宽度, 沟面宽度是指两沟臂上口与原地表面交线之间的横向距离。为了测定正常开沟时的指标值, 在进刀 300 mm 后沿进刀方向每相隔 125 mm 取一个测量点, 共测量 10 次, 分别测量开沟深度 h_i 和沟面宽度 B_i , 参照式(4)求平均值即为开沟深度 h , 同理即为沟面宽度 B 。开沟深度的测量方法为在导出测量断面沟顶点和沟底点的 y 坐标, 开沟深度 h_i 等于沟顶点的 y 坐标与沟底点的 y 坐标之差(图 3)。开沟宽度的测量方法是导出测量断面两沟壁上沿两土粒的 x 坐标, 开沟宽度 B_i 等于该两 x 坐标之差。

2.4.2 开沟深度稳定性

开沟深度稳定性表示了开沟器在给定的工作条件下开沟深度的稳定程度, 用开沟深度稳定性系数 U 表示, 可按照式(5)一式(7)求得。NY/T740-2003 要求开沟深度稳定性系数 $U \geq 80\%$ 。

$$h = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{N} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h)^2}{N - 1}} \quad (5)$$

$$V = \frac{S}{h} \times 100\% \quad (6)$$

$$U = 1 - V \quad (7)$$

式中： h_i 为第 i 个测量点的开沟深度值； N 为在作业区内选定的测量点数； S 为开沟深度标准差； V 为开沟深度变异系数。

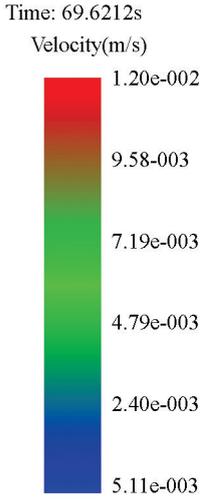


图 2 开沟仿真结果图

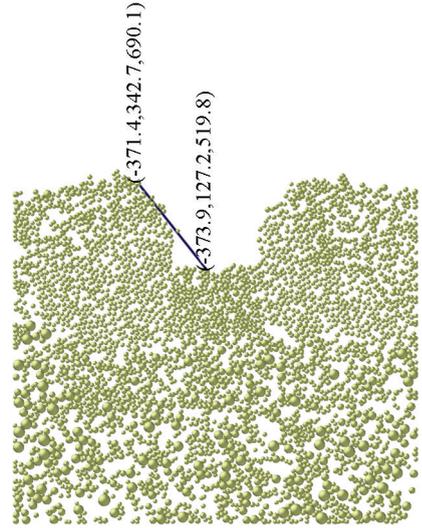


图 3 开沟深度的测量

2.4.3 沟底浮土厚度和抛土均匀性

沟底浮土厚度是指沟底面上积聚的各种碎土的平均厚度。抛土均匀性是指抛落的土块在畦面上分布的均匀程度。由于刚进刀时和开沟末端有土块溢出计算区域，待进刀 300 mm 稳定开沟后，取 1 m 长的一段沟作为测量区域，测量沟底的回土量以及沟两侧落在畦面上的抛土量。

3 结果与分析

3.1 开沟宽度、深度及其稳定性

沿进刀方向每隔 125 mm 作为一个测量点，10 个测量点的开沟深度和宽度见表 3。平均开沟宽度为 293.72 mm，平均深度为 316.54 mm，开沟深度稳定性为 87.32%，满足 NY/T740-2003 的 $U \geq 80\%$ 开沟稳定性要求。

表 3 开沟深度、宽度及沟底浮土厚度

测量点	x 坐标	沟宽(B)/mm	沟深(h)/mm	沟底浮土 y 坐标	浮土厚度/mm
1	750	270.3	359.41	/	/
2	625	305.6	353.12	/	/
3	500	271.9	322.2	113.08	13.08
4	375	285.9	325.4	114.11	14.11
5	250	309.8	339.1	122.26	22.26
6	125	276.5	297.5	131.87	31.87
7	0	343.2	319.6	133.19	33.19
8	-125	297.4	324.3	122.21	22.21
9	-250	282.8	309.3	112.11	12.11
10	-375	293.8	215.5	112.84	12.84
平均值		293.72	316.54	120.21	20.21
标准差(S)		22.0178	40.1234		
变异系数(V)/%		7.40	12.68		
稳定性系数(U)/%		92.6	87.32		

3.2 沟底浮土厚度和抛土均匀性

由图 4 可见, 沟底浮土较少. 设置一个选择集, 中心点坐标为(250, 350, 500), 大小为长 1 000 mm、宽 300 mm、高 200 mm, 该选择集包含测量区域内的所有沟底浮土, 输出该选择集土块的质量约为 6.924 kg. 为了测定沟底浮土厚度, 沿进刀方向在测量区域内每隔 125 mm 作为一个测量断面, 测量沟底浮土最上面的一层土块的 y 坐标, 取其平均值减去螺旋刀底端中心点的 y 坐标即为浮土厚度(表 3). 可见, 沟底浮土的平均厚度约为 20.2 mm < 0.1*h*.

为了测定沟两侧畦上抛土量, 评价其均匀性. 设置两个选择集(图 5), 大小均为长 1 000 mm、宽 200 mm、高 400 mm, 中心点分别为(250, 450, 600), (250, 450, 200), 测得这两个选择集土块的质量分别为 19.293 2, 18.248 8 kg, 即为沟两侧测量区域的抛土量. 图 6、图 7 为沟左右两侧抛土分布图和开沟方向抛土分布图. 沟两侧抛土沿开沟方向抛土较为均匀; 横向排土量, 沟边堆高较高, 越往两侧, 抛土越少, 抛土最远的达到土槽边缘.

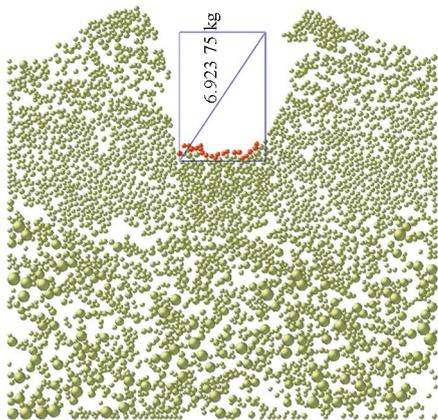


图 4 沟底浮土质量及厚度

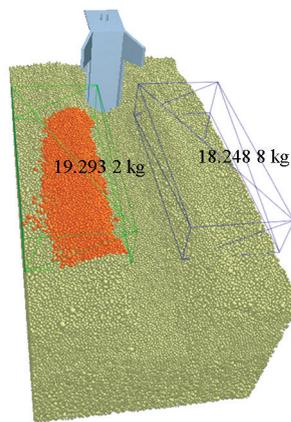
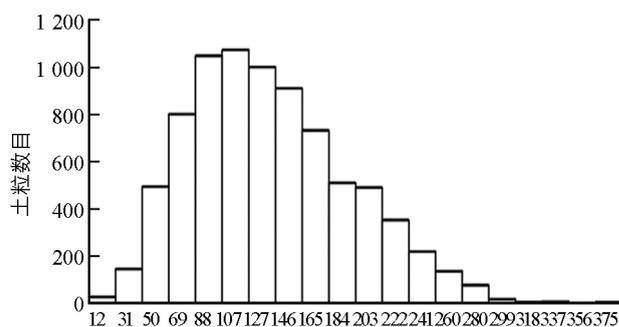
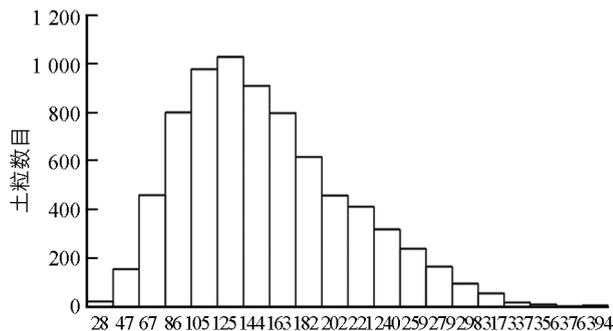


图 5 畦上抛土量



距沟壁的距离 /mm

(a) 沟左侧



距沟壁的距离 /mm

(b) 沟右侧

图 6 横向抛土量分布图

4 土槽对比试验

为了验证仿真试验结果, 在湖南农业大学土槽实验室进行了验证试验. 试验装置如图 8 所示, 调速电动机经蜗轮蜗杆减速器减速, 通过联轴器带动螺旋开沟刀旋转, 另一台电磁调速电动机带动卷筒转动, 卷绕钢丝绳拖动台车进给. 土槽土地平整, 没有翻耕, 表土经滚轮压实. 取样采用烘干法测得深度 20~40 cm 时的平均含水率为 25.7%.

设定螺旋开沟刀的转速为 180 r/min, 分别以 0.06, 0.07, 0.15 m/s 的进刀速度作了 3 次试验, 开沟沟型整齐, 沟壁光滑; 沟宽为 25±0.5 cm; 沟深分别为 24, 40, 20 cm, 平均沟深为 28 cm. 沟底回土较多, 铲出沟底浮土称质量分别为 7.05, 7.85, 8.10 kg, 平均值为 7.667 kg, 比仿真结果大 10.73%. 抛土的结果和

仿真结果相似,沟沿两侧堆土较高,越往两侧抛土量越少,抛土最远达 50 cm,如图 9 所示。

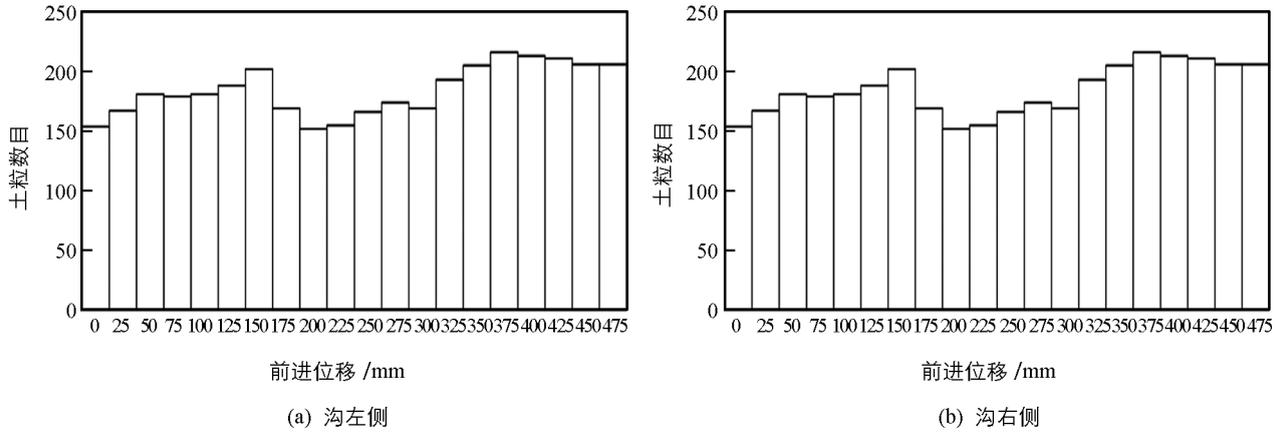


图 7 开沟方向抛土量分布图

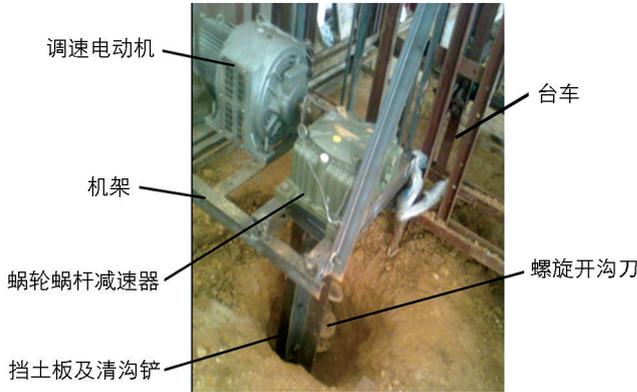


图 8 螺旋开沟试验装置



图 9 土槽开沟试验结果

5 结 论

1) 采用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型能较好地模拟板结土壤开沟过程,并能对开沟质量指标进行定量检测和分析,弥补物理试验的不足。

2) 当立式螺旋开沟器以转速 180 r/min、进给速度 0.027 m/s 开沟时,开沟宽度平均值为 29.4 cm,平均深度为 31.7 cm,开沟深度稳定性为 87.32%,满足 NY/T740-2003 的 $U \geq 80\%$ 开沟稳定性要求。沟两侧抛土沿开沟方向较为均匀,沿宽度方向,沟边堆高较高,越往两侧,抛土越少,抛土幅宽达到 50 cm。

3) 开沟质量与开沟器的结构参数和工作参数有关,如螺旋升角、刀具转速、进给速度等;也与开沟器的工作条件有关,如土壤的坚实度、含水率等。其它有待后续做进一步研究。

参考文献:

- [1] 肖宏儒,赵映,丁文芹,等. 1KS60-35X 型果园双螺旋开沟施肥机刀轴设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 32-39.
- [2] 吕正洋. 降低立式螺旋开沟机功率消耗的途径 [J]. 农业机械学报, 1994, 25(2): 78-83.
- [3] 邓洪超,李婧. 小口径立式螺旋开沟器的结构分析与设计 [J]. 工程机械, 2008, 39(3): 9-13, 113.
- [4] 张泉泉,李萍萍,朱长顺,等. 立式螺旋开沟器土槽试验装置 [J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(8): 725-729.
- [5] 夏俊芳,贺小伟,余水生,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的螺旋刀辊土壤切削有限元模拟 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 34-41, 293.
- [6] 薛子萱,吕新民,唐卫卫. 螺旋刀具土壤切削过程模拟分析——基于 ANSYS/LS-DYNA971 [J]. 农机化研究, 2011,

33(4): 13-16.

- [7] 陈 睿, 张建军. 基于 SPH 方法的果园螺旋开沟器功耗分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(12): 168-172.
- [8] 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.
- [9] 方会敏, 姬长英, 张庆怡, 等. 基于离散元法的旋耕刀受力分析 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 54-59.
- [10] 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.
- [11] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Defining the Effect of Sweep Tillage Tool Cutting Edge Geometry on Tillage Forces Using 3D Discrete Element Modelling [J]. Information Processing in Agriculture, 2015, 2(2): 130-141.
- [12] 杨丹彤, 区颖刚. 在立式螺旋作用下土壤破坏规律的试验研究 [C] // 第九届全国地面机器系统学会学术年会, 广州, 1998: 115-119.
- [13] 谢有才, 杜玉明, 潘凤章. 可展变螺距螺旋面的展开 [J]. 天津大学学报, 1998, 31(1): 79-84.
- [14] LTD D S. EDEM 2017 User Guide [M]. Edinburgh: DEM Solutions Ltd., 2017: 55-56.
- [15] 李明生, 叶 进, 李 登, 等. 基于离散单元法的荞麦播种机排种器设计与试验 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 78-85.
- [16] 贺一鸣, 向 伟, 吴明亮, 等. 基于堆积试验的壤土离散元参数的标定 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(2): 216-220.

Estimation of the Operation Quality of Vertical Helix Furrow Openers Based on the Discrete Element Method

YANG Wen-min^{1,2,3}, WU Bei^{1,2}, PENG Zhi¹, TAN Shi-wei¹

1. College of Engineering, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern Agricultural Equipment, Changsha 410128, China;

3. Collaborative Innovation Center of Southern Chinese Grain and Oilseed Crops, Changsha 410128, China

Abstract: In order to evaluate the operation quality of vertical helix furrow openers (ditchers) quantitatively, a discrete element model was built to simulate the interaction between the vertical helix furrow opener and the soil. The Hertz-Mindlin with Bonding contact model was selected to calculate the contact force between soil particles. The ditching process was simulated by setting the rotation speed of the furrow opener at 180 r/min and the forward speed at 0.027 m/s, and ditching a furrow 1.88 m in length. The operation quality indexes were measured by using the Ruler and Queries Tools, which can be found in the EDEM software Analyst module. The results showed that the average ditching width was 29.4 cm, the average ditching depth was 31.7 cm, the stability coefficient of the ditching depth was 87.32% and the mass of loose soil in the furrow bottom was 6.924 kg/m, all of which met the requirements of the national standard Field Operation Quality of Ditchers (NY/T 740-2003).

Key words: furrow opener (ditcher); vertical helix; operation quality; discrete element method; EDEM

责任编辑 汤振金