

# 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析<sup>\*</sup>

于建群<sup>1</sup> 钱立彬<sup>1</sup> 于文静<sup>2</sup> 潘世强<sup>1</sup> 方瑛<sup>3</sup> 付宏<sup>2</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学计算机科学与技术学院, 长春 130012;  
3. 吉林大学测试科学实验中心, 长春 130026)

**【摘要】** 建立了芯铧式开沟器和播种施肥开沟器与土壤颗粒的二维离散元法分析模型, 采用离散元法研究开沟器的工作过程及工作阻力, 通过改变开沟器的 CAD 模型和土壤颗粒参数, 分析不同条件下开沟器的工作阻力。在室内土槽进行了 2 种开沟器的工作阻力测试, 并将测试结果与开沟器工作阻力的离散元法计算结果进行了比较, 两者的变化趋势基本一致, 相对误差在 10%~20% 之间, 由此初步证明了采用离散元法分析开沟器工作过程和工作阻力的可行性, 为开沟器的研究和优化设计提供了一种新方法。

**关键词:** 开沟器 离散元法 土壤颗粒 数字化设计

**中图分类号:** S223.2; TP391.9

**文献标识码:** A

## DEM Analysis of the Resistances Applied on Furrow Openers

Yu Jianqun<sup>1</sup> Qian Libin<sup>1</sup> Yu Wenjing<sup>2</sup> Pan Shiqiang<sup>1</sup> Fang Ying<sup>3</sup> Fu Hong<sup>2</sup>

(1. School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China  
2. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China  
3. Testing Science and Experiment Center, Jilin University, Changchun 130026, China)

### Abstract

In order to analyze the factors that affect the performance of a furrow opener, the two-dimensional DEM (discrete element method) analyzing models of two types of furrow openers and soil particles were built up. Through changing the CAD models of furrow openers, for each type of furrow openers, the operating processes and resistances in three kinds of soils with different moisture content at three different velocities and depths were analyzed by using the DEM. The performance of the openers was tested at each operating states in lab. The simulation results is in good correlation with the experimental results and the relative errors are within 10%~20%. It can be proved that it's feasible and favourable to analyze the performances of furrow openers by using the DEM and it provides a new method to study and design furrow openers.

**Key words** Furrow openers, Discrete element methods, Soil particles, Digital design

### 引言

开沟器工作时, 始终存在着土壤颗粒之间及土壤颗粒与开沟器之间的接触作用和土壤颗粒群体的运动过程。一个好的开沟器设计, 应使土壤颗粒按照预期的方式运动, 减少开沟器工作过程的阻力以

节省动力消耗, 此时必须考虑土壤颗粒之间及土壤颗粒与开沟器之间的接触作用和土壤颗粒群体的动力学问题。采用连续介质力学方法如有限元法, 只能把土壤颗粒群体作为一个整体来考虑, 无法分析土壤颗粒群体中每个颗粒的运动过程及土层破裂和颗粒的分离、混合和流动等过程<sup>[1]</sup>, 因此不能很好

收稿日期: 2008-07-28 修回日期: 2008-09-09

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(60673033)、国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z125)和“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11A01)

作者简介: 于建群, 教授, 主要从事农业机械数字化设计研究, E-mail: yujianqun@jlu.edu.cn

通讯作者: 付宏, 教授, 主要从事计算机仿真与软件工程研究, E-mail: fuhong@jlu.edu.cn

地分析开沟器的工作过程。目前,进行开沟器设计时大多依靠设计者的经验和试验方法,既费时、费力,又得不到理想的设计效果。

本文选用一种芯铧式开沟器和一种播种施肥开沟器及壤土为研究对象,采用二维离散元法<sup>[2]</sup>,分析开沟器的工作过程及其水平工作阻力和垂直作用力,并将离散元法分析计算结果与开沟器的室内土槽试验结果进行比较,由此证明采用离散元法分析开沟器工作过程及其工作阻力的可行性和优点。

## 1 模型建立和参数选取

本文选用的2种开沟器如图1所示。在采用离散元法分析开沟器工作过程时,首先应建立开沟器的离散元法分析模型。本文由开沟器的二维CAD模型(图1)建立开沟器的二维离散元法分析模型,即通过CAD软件的二次开发读取开沟器与土壤颗粒接触作用的图元(如直线段、圆弧段和椭圆弧段

等)及其尺寸参数,然后通过添加运动属性和材料特性参数,来建立开沟器的离散元法分析模型<sup>[3]</sup>,如图2所示。采用二维集成设计分析软件<sup>[4]</sup>进行开沟器工作过程及工作阻力分析。

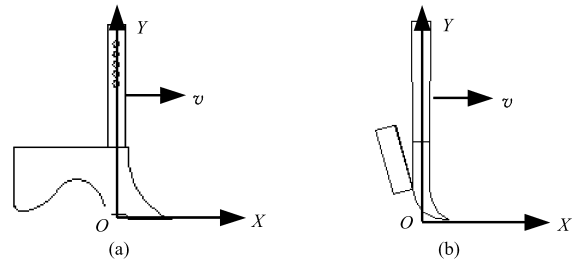


图2 2种开沟器的二维离散元法分析模型

Fig.2 Analyzing model of the two furrow openers in the two dimensional DEM

(a) 芯铧开沟器 (b) 施肥开沟器

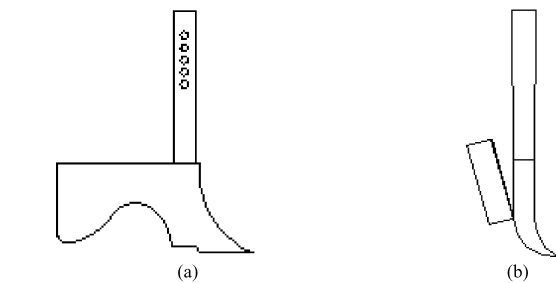


图1 开沟器的二维CAD模型(主视图)

Fig.1 Two dimensional CAD model

(a) 芯铧开沟器 (b) 施肥开沟器

由于土壤颗粒细小、数量多、结构复杂,为了简化计算,采用圆盘颗粒模型建立土壤颗粒的二维离散元法分析模型。采用线性粘弹性接触力学模型计算土壤颗粒之间及土壤颗粒与开沟器之间的接触作用力<sup>[5]</sup>。土壤颗粒之间及土壤颗粒与开沟器之间接触的法向刚度系数 $k_n$ 和切向刚度系数 $k_s$ ,通过二维集成设计分析软件<sup>[4]</sup>模拟土壤的双轴试验和直剪试验得到<sup>[6]</sup>。法向阻尼系数 $c_n$ 和切向阻尼系数 $c_s$ 分别由式 $c_n = \frac{2\ln e \sqrt{mk_n}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}}$ 和 $c_s = \frac{2\ln e \sqrt{mk_s}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}}$ 计算<sup>[7]</sup>,式中碰撞恢复系数 $e = 0.1 \sim 0.3$ , $m$ 为单粒土壤颗粒的质量。仿真时选取的土壤颗粒参数值如表1所示<sup>[6]</sup>。

表1 离散元法仿真分析时参数选取

Tab.1 Selection of parameters for DEM analysis

参数	数值		
土壤含水率/%	3	12	22
土壤颗粒半径 $r/m$	0.001 5~0.002 5	0.001 5~0.002 5	0.001 5~0.002 5
土壤颗粒密度 $/kg \cdot m^{-3}$	1 335	1 300	1 255
仿真时土壤颗粒数	4 000~6 500	4 000~6 500	4 000~6 500
土壤颗粒之间接触的法向刚度系数 $k_{n1}/N \cdot m^{-1}$	4 000	6 500	23 000
土壤颗粒与开沟器之间接触的法向刚度系数 $k_{n2}/N \cdot m^{-1}$	6 500	9 000	30 000
土壤颗粒之间接触的切向刚度系数 $k_{s1}/N \cdot m^{-1}$	3 500	6 000	18 000
土壤颗粒与开沟器之间接触的切向刚度系数 $k_{s2}/N \cdot m^{-1}$	6 000	8 500	25 000
土壤颗粒之间的摩擦因数 $\mu_1$	0.308	0.257	0.224
土壤颗粒与开沟器之间的摩擦因数 $\mu_2$	0.40	0.40	0.40
土壤颗粒之间的法向阻尼系数 $c_{n1}/N \cdot m \cdot s^{-1}$	0.14	0.22	0.47
土壤颗粒与开沟器之间的法向阻尼系数 $c_{n2}/N \cdot m \cdot s^{-1}$	0.22	0.28	0.53
土壤颗粒之间的切向阻尼系数 $c_{s1}/N \cdot m \cdot s^{-1}$	0.11	0.18	0.40
土壤颗粒与开沟器之间的切向阻尼系数 $c_{s2}/N \cdot m \cdot s^{-1}$	0.18	0.25	0.48

## 2 开沟器的工作阻力分析

### 2.1 开沟深度

本文分别分析3种开沟深度对开沟器阻力的影响,其中芯铧开沟器的开沟深度为30、60和90 mm,施肥开沟器的开沟深度为50、75和100 mm。为了精确控制开沟器与土壤接触作用的深度即开沟深度,在绘制CAD图时把开沟器在高度方向上划分为3段(图3),这样当计算某一开沟深度(如30 mm)的阻力时,只需计算该高度(30 mm)线段与土壤颗粒

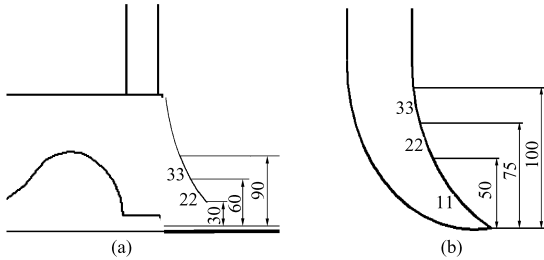


图3 与颗粒接触的开沟器曲线沿高度分段

Fig.3 Curve subsection of the furrow openers contacting with soil particles in height  
(a) 芯铧开沟器 (b) 施肥开沟器

的接触作用合力即可。离散元法仿真得到的芯铧开沟器和施肥开沟器的工作过程如图4所示。仿真计算得到的某一条件下开沟器的水平工作阻力变化如图5所示。由图5可知,开沟器的工作阻力是变化(波动)的,其平均值由刚入土时的零逐渐增大,直到达到某一值时趋于平稳。某一条件下开沟器的工作

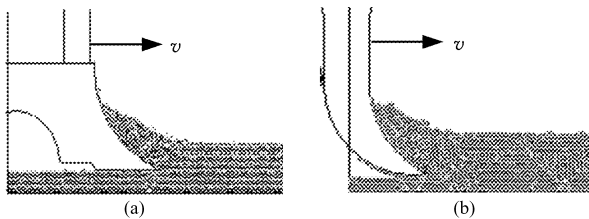


图4 开沟器工作过程的离散元法仿真分析

Fig.4 Simulating and analyzing of operating process for two furrow openers in DEM  
(a) 芯铧开沟器 (b) 施肥开沟器

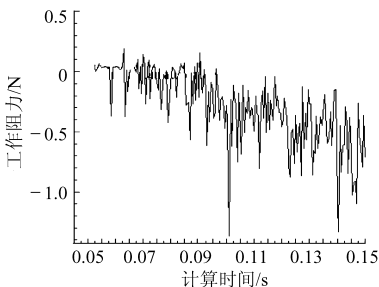


图5 仿真得到的开沟器工作阻力变化曲线

Fig.5 Simulating results of the horizontal resistance forces applied on furrow openers

阻力即为趋于平稳状态时的平均值。

由于本文采用二维离散元法模拟,因此得到的阻力值还应乘以开沟器的宽度,以近似得到开沟器的工作阻力。其中施肥开沟器的宽度为13 mm,芯铧开沟器的宽度是变化的,因此取平均宽度45 mm。当开沟器工作速度0.5 m/s、土壤含水率为3%时,由离散元法计算得到的2种开沟器的水平工作阻力 $F$ 和垂直作用力 $Q$ 变化曲线如图6所示。由图看出,随着开沟深度的增加,水平工作阻力增加比垂直作用力增加要大。

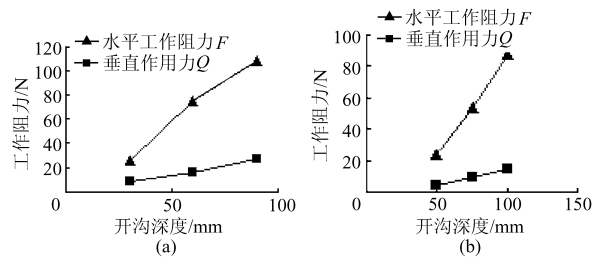


图6 不同开沟深度时由离散元法仿真得到的开沟器工作阻力变化曲线(工作速度0.5 m/s)

Fig.6 Simulating results of the resistance forces applied on the furrow opener at different depth  
(a) 芯铧开沟器 (b) 施肥开沟器

### 2.2 工作速度

当开沟深度为60 mm、土壤含水率为3%,工作速度分别为0.2、0.5和0.8 m/s时,由离散元法计算得到2种开沟器的水平工作阻力 $F$ 和垂直作用力 $Q$ 的变化曲线如图7所示。从图7可以看出,随着工作速度的增加,垂直作用力增加较小,而水平工作阻力增加较大。

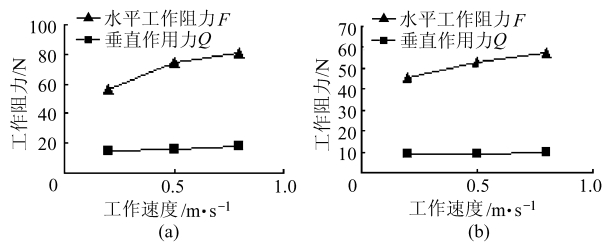


图7 不同工作速度时由离散元法仿真得到的开沟器工作阻力变化曲线(开沟深度60 mm)

Fig.7 Simulating results of the resistance forces applied on the furrow opener at different velocity  
(a) 芯铧开沟器 (b) 施肥开沟器

### 2.3 土壤含水率

当开沟深度分别为30、60和90 mm及土壤含水率分别为3%、12%和22%时,由离散元法计算得到的芯铧开沟器的的水平工作阻力 $F$ 和垂直作用力 $Q$ 的变化曲线如图8所示。从图中可以看出,随着土壤含水率的增加,开沟器的水平工作阻力及垂直作用力均增加,但垂直作用力增加缓慢。

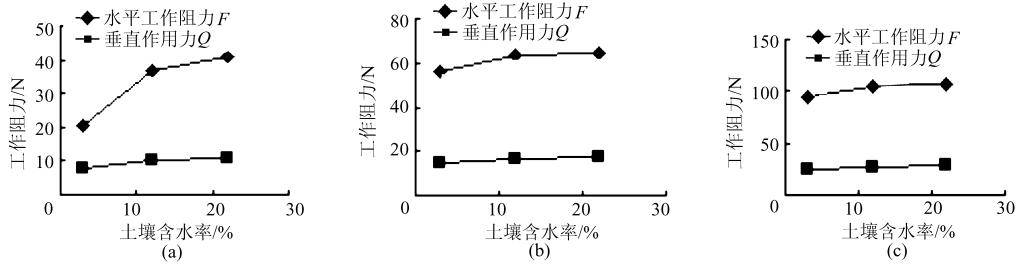


图8 离散元法仿真得到不同开沟深度和含水率时芯铧开沟器的工作阻力变化曲线

Fig.8 Simulating results of the resistance forces applied on the furrow opener at different depth and moisture

(a) 开沟深度为 30 mm (b) 开沟深度为 60 mm (c) 开沟深度为 90 mm

### 3 仿真结果与试验结果的比较

为了检验离散元法仿真结果的可信程度,对开沟器的水平工作阻力和垂直作用力进行了室内测试<sup>[6]</sup>。测试选用八角环传感器和 DH-3817 型动静态测试系统,试验土槽全长 11 m,试验时将土槽分成 3 个部分,其中开沟器入土区 1.5 m,稳定工作区 8 m,出土区 1.5 m。

图 9 和图 10 为土壤含水率 3%、工作速度 0.2 m/s 时,2 种开沟器在不同开沟深度的条件下,工作阻力的仿真结果和测试结果的对比。

图 11 和图 12 为土壤含水率 3%、开沟深度 30 mm 时,2 种开沟器在不同工作速度的条件下,工

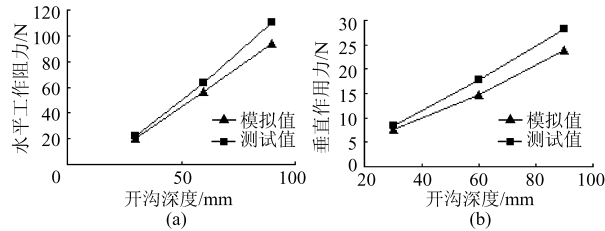


图9 不同开沟深度时芯铧开沟器工作阻力的模拟值与测试值对比

Fig.9 Comparison of experimental results and simulation results for the resistance forces applied on the furrow opener at different depth

results for the resistance forces applied on the furrow opener at different depth

(a) 水平工作阻力 (b) 垂直作用力

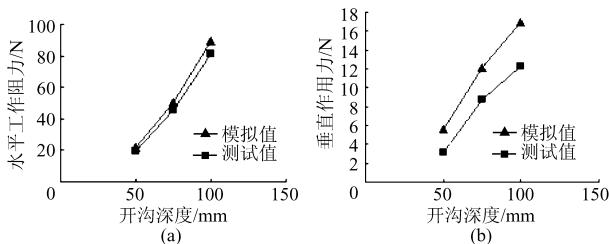


图10 不同开沟深度时施肥开沟器工作阻力的模拟值与测试值对比

Fig.10 Comparison of experimental results and simulation results for the resistance forces applied on the Fertilization furrow opener at different depth

(a) 水平工作阻力 (b) 垂直作用力

作阻力的仿真结果和测试结果的对比。图 13 给出工作速度为 0.2 m/s、开沟深度为 30 mm 时,芯铧开沟器在不同土壤含水率的条件下,工作阻力的仿真结果和测试结果的对比。

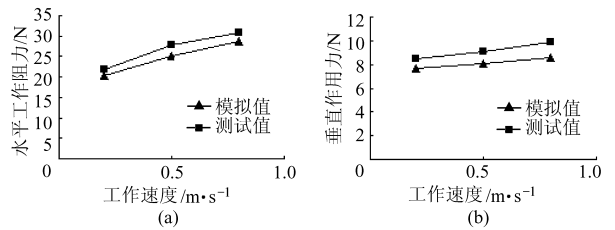


图11 不同工作速度时芯铧开沟器工作阻力的模拟值与测试值对比

Fig.11 Comparison of experimental results and simulation results for the resistance forces applied on the furrow opener at different velocity

(a) 水平工作阻力 (b) 垂直作用力

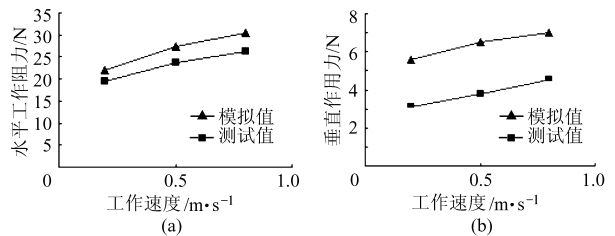


图12 不同工作速度时施肥开沟器工作阻力的模拟值与测试值对比

Fig.12 Comparison of experimental results and simulation results for the resistance forces applied on the fertilization furrow opener at different velocity

(a) 水平工作阻力 (b) 垂直作用力

从图中可以看出,仿真计算结果和试验测试结果变化趋势基本一致,数值相近,相对误差在 10% ~ 20% 之间,都是随着开沟器的开沟深度、工作速度的增加而增加。上述工作初步证明了采用离散元法分析开沟器工作阻力的可行性,为开沟器的研究和优化设计提供了一种新方法。

### 4 结论

(1) 采用离散元法分析开沟器的工作过程,可

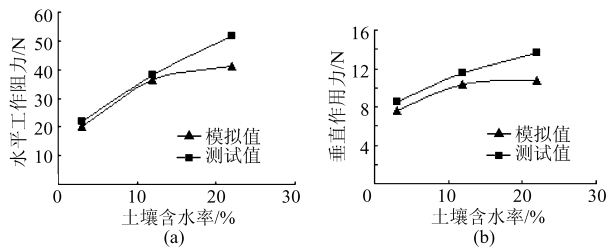


图 13 不同土壤含水率时芯铧开沟器工作阻力的模拟值与测试值对比

Fig. 13 Comparison of experimental results and simulation results for the resistance forces applied on the furrow opener at different moisture  
(a) 水平工作阻力 (b) 垂直作用力

以从细观角度详细分析不同条件下开沟器的工作过程及工作阻力,由此评价开沟器的工作性能,如所开

沟的形状、尺寸和开沟器的工作阻力等。

(2) 由开沟器工作阻力的离散元法仿真计算结果与试验测试结果可知,两者数值相近、变化较一致,相对误差在 10%~20% 之间,由此初步证明了采用离散元法分析开沟器工作阻力的可行性,为开沟器的研究和优化设计提供了一种新方法。

(3) 仿真计算过程中选取的接触作用力学模型及其参数,是影响分析精度的主要因素。由于土壤颗粒的力学性质很难直接测试,因此本文采用模拟土壤双轴试验和直剪试验的方法来确定。而如何更好地选取接触作用的力学模型及其参数,以使离散元法的仿真结果与实际试验结果能更好地吻合,还需要深入研究。

### 参 考 文 献

- Shmulevich I, Asaf Z, Rubinstein D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(1): 37~50.
- Cundall P A, Strack O L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47~65.
- 付宏,董劲男,于建群. 基于 CAD 模型的离散元法边界建模方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2005, 35(6): 626~631.  
Fu Hong, Dong Jinnan, Yu Jianqun. Method based on CAD model for DEM boundary modeling[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(6): 626~631. (in Chinese)
- 付宏,董劲男,刘振宇,等. 精密排种器的集成分析设计系统开发研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(5): 744~750.  
Fu Hong, Dong Jinnan, Lin Zhenyu, et al. R&D of integrated analyzing & designing system for precision seed metering devices[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(5): 744~750. (in Chinese)
- Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(13): 3 378~3 396.
- 钱立彬. 基于离散元法的开沟器的数字化设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.  
Qian Libin. Digital design method of furrow openers based on DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- Klinker D H, Henderson J M. Flow model development for spherical discrete objects[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(1): 225~233.