

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.003

# 基于 DEM - MBD 耦合算法的自激振动深松机仿真分析

袁 军<sup>1,2</sup> 于建群<sup>1</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林农业大学工程技术学院, 长春 130118)

**摘要:** 自激振动深松机的设计主要采用田间试验及理论分析方法,但田间试验成本高、周期长,同时理论分析尚不具备完整准确的解析解。为提高该类机具的设计效率,保证设计结果的准确性和可靠性,本文在课题组研制的 Agri-DEM 软件平台上,添加了离散元法 (DEM) 与多体动力学 (MBD) 耦合算法,然后利用该算法对自激振动深松单体作业过程进行仿真分析。耦合算法中,采用 MBD 方法建立了台车-深松机-悬挂架-土壤的系统动力学模型,包括 7 个活动刚体、1 个滑移铰、7 个转动铰、1 个滑移驱动、1 个弹簧力约束和 1 个阻尼约束,同时利用广义坐标分块算法将系统微分代数方程组转化为微分方程组,并通过亚当斯-莫尔顿校正算法进行积分,求解获得各刚体的运动学参数和动力学参数;采用 DEM 方法建立了耕作土壤的离散元模型,考虑土壤颗粒的黏附力,提出一种适合于土壤等湿颗粒间的接触力学模型——湿颗粒模型,模型参数通过试凑法确定。对模型进行深松铲的动力学响应分析、弹簧及牵引力动力学响应分析和土壤扰动过程分析,仿真结果表明:土槽台车前进速度为 0.5 m/s 时,机具牵引力周期性变化的区间为 -331.06 ~ 1 492.75 N,最大牵引力为 1 492.75 N;深松铲的入土角周期性变化的区间为 0 ~ -0.11 rad,在高度方向上铲柄质心的变化区间为 -400.33 ~ -581.37 mm;激振弹簧受载也呈周期性变化,变化区间为 2 623 ~ -2 231 N;深松铲铲尖部位抬升土壤,土壤颗粒扰动量在铲尖区域最大,并沿深松铲前进方向和侧向依次递减。仿真结果直观的呈现了自激振动深松机的作业过程及土壤颗粒的运动情况,定性的解释了自激振动深松机的减阻机理。本文添加的 DEM - MBD 耦合算法,为自激振动深松机工作过程分析和优化设计提供了一种新方法。

**关键词:** 自激振动深松机; 多体动力学; 离散元法; 耦合算法

**中图分类号:** TH11      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0017-08

## Analysis on Operational Process of Self-excited Vibrating Subsoiler Based on DEM - MBD Coupling Algorithm

YUAN Jun<sup>1,2</sup> YU Jianqun<sup>1</sup>

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

(2. College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** In order to increase the design efficiency of self-excited vibrating subsoiler, ensure the accuracy and reliability of design results, DEM - MBD coupling algorithm developed by Agri - DEM was employed, and the operational process of type 1S - 300 self-excited vibrating subsoiler was simulated. Through MBD modules, a system dynamics model was established, including trolley-subsoiler-suspension-soil. Based on DEM modules, a discrete element model of soil with consideration on the adhesion of soil particles was established. The wet particle model was used, which was invented by the research team, as the contact mechanics model of soil particles, and the model parameter was identified by repeated tests. After disturbance analysis of soil, traction analysis of trolley and dynamic response analysis of subsoiling shovel, the outcome indicated that when the subsoiling shovel entered the soil, the soil above the shovel top was lifted, and the soil on both sides of the shovel edge was divided by cutting, the resistance range was from 363 N to 1 000 N, the change interval in the height direction of the subsoiler was from 0 mm to 181 mm, the spring load change interval was from 2 623 N to -2 231 N. If the torque of subsoiling shovel

收稿日期: 2020-07-30 修回日期: 2020-09-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700104)和国家自然科学基金项目(51675218)

作者简介: 袁军(1985—),男,博士生,吉林农业大学讲师,主要从事农业机械数字化设计研究,E-mail: 349835947@qq.com

通信作者: 于建群(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械数字化设计和离散元软件研究,E-mail: yujianqun@jlu.edu.cn

caused by soil particles was higher than that caused by a spring, the shovel would rotate anticlockwise by centering the hinge point. Simulation results directly reflected the cyclical change of tillage resistance, as well as the movement of soil particles. Furthermore, it explained the resistance reduction mechanism of self-excited vibrating subsoiler. To sum up, DEM - MBD coupling algorithm provided a new approach for the development of this model.

**Key words:** self-excited vibrating subsoiler; multi-body dynamics; discrete element method; coupling algorithm

## 0 引言

自激振动深松机利用弹簧作为蓄能器,通过弹簧存储和释放内能来适应耕作阻力的变化,减阻效果明显<sup>[1-3]</sup>。该类机具的研究方法主要采用田间试验和理论分析<sup>[4-6]</sup>,需要投入较大的人力物力,同时深松耕作阻力受载情况复杂,理论计算尚不具备完整准确的解析解。随着计算机技术的不断进步,计算机仿真技术已应用到农机生产的各个领域,助力农机装备的高速发展<sup>[7-11]</sup>。

离散元仿真技术可以模拟耕作部件与土壤之间的相互作用,求解耕作部件受力及土壤颗粒群体的运动,进而对耕作部件进行优化设计<sup>[12-15]</sup>。目前,离散元法在深松机具研制方面的应用仅限于深松铲,而对深松机整机的研究,特别是自激振动深松机的研究尚未见报道。土壤深松作业系统是由耕作土壤、作业机具和动力机械所构成,系统的仿真与机具的优化需要综合运用离散元法(DEM)和多体动力学法(MBD)联合仿真。现有的DEM仿真软件没有机械系统动力学分析功能,只得借助第三方软件。

为解决上述问题,本文在课题组研制的 Agri-DEM 软件平台上开发 MBD 程序,用以求解机械系统动力学问题。同时,利用 DEM 和 MBD 耦合算法建立台车-悬挂-自激振动深松机-耕作土壤系统仿真模型,仿真机具与土壤系统间的相互作用关系,验证该耦合算法在自激振动深松机设计中应用的可行性。

## 1 自激振动深松机多体动力学建模

### 1.1 自激振动深松机三维模型

以 1S-300 型自激振动深松作业单体为研究对象,利用 Pro/E 5.0 软件建立其三维模型,如图 1 所示,模型主要由 8 部分组成,分别为深松铲、地轮、地轮、下拉杆、台车、上拉杆、机架和弹簧。整机长×宽×高为 1 800 mm×1 400 mm×1 200 mm。台车是系统的动力部分,受速度驱动,速度  $v$  为 0.5 m/s,系统同时受重力作用。

### 1.2 多刚体动力学建模

程序在对自激振动深松机-悬挂系统进行动力

学建模时,需要对自激振动深松机-悬挂系统各刚体与铰进行标号。该系统模型活动刚体个数为  $N=7$  (弹簧作为力约束的一种形式,不作为刚体),它们分别为深松铲 B1、左地轮 B2、右地轮 B3、下拉杆 B4、台车 B5、上拉杆 B6、机架 B7,如图 2a 所示。系统各物体相互连接关系如图 2b 拓扑构型所示,各刚体和铰链号与图 2a 中几何模型一一对应。

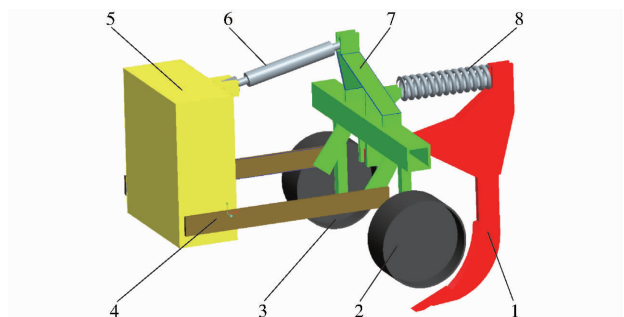
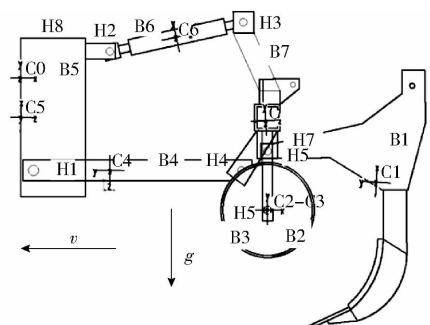


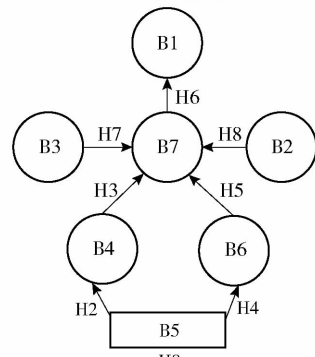
图 1 系统三维模型

Fig. 1 3D model of system

1. 深松铲 2. 左地轮 3. 右地轮 4. 下拉杆 5. 台车 6. 上拉杆 7. 机架 8. 激振弹簧



(a) 刚体和约束定义



(b) 拓扑关系

图 2 多体系统动力学模型

Fig. 2 Model of multibody system dynamics

对于 7 个做平面运动的多刚体系统,首先在系统的运动平面上定义惯性基,记为  $C_0 = [x \ y]^T$ 。在 7 个刚体上过其质心  $C_i$  建立连体基  $C_i = [x^i \ y^i]^T$ 。将该刚体质心  $C_i$  相对惯性基的坐标记为  $(x_i, y_i)$ ,连体基的基矢量  $x^i$  与惯性基的基矢量  $x$  正向夹角记为  $\varphi_i$ ,如图 2a 所示,它们将唯一确定刚体的位形,这些参数构成描述刚体的笛卡尔坐标,定义  $q_i$  为行矩阵,公式表示为

$$q_i = [x_i \ y_i \ \varphi_i] \quad (1)$$

对于本系统的各刚体的笛卡尔坐标及广义质量参数见表 1,7 个列阵组构成了描述自激振深松机-悬挂系统多刚体系统的笛卡尔坐标列阵

$$q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6 \ q_7] \quad (2)$$

整个系统的笛卡尔坐标阵中的坐标个数记为  $n$ ,可知  $n = 3 \times 7 = 21$ 。

系统各构件之间通过各类铰约束连接,据此建立系统的位置约束方程组、速度约束方程组和加速

度约束方程组,其一般表达式为

$$\Phi(q, t) = 0 \quad (3)$$

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_t \quad (4)$$

$$\Phi_q \ddot{q} = \gamma \quad (5)$$

式中  $\Phi$ ——位置约束方程组

$\Phi_q$ —— $\Phi$  对应的雅可比矩阵

$\dot{q}$ ——坐标阵  $q$  的一阶导(即广义坐标的速度阵)

$\ddot{q}$ ——坐标阵  $q$  的二阶导(即广义坐标的加速度阵)

$\Phi_t$ ——速度约束方程组的右项

$\gamma$ ——加速度约束方程右项

图 2a 为系统建立的连体基和公共基及刚体、铰标号,由图可知,系统有滑移铰 1 个、转动铰 7 个、滑移驱动 1 个,约束方程有  $s = 2 \times 8 + 1 = 17$  个。机构的自由度  $\delta = 21 - 17 = 4$ 。根据图 2b 定义的每个刚体约束关系如表 2 所示,其中深松铲 B1 与机架

表 1 各构件笛卡尔坐标及广义质量参数

Tab. 1 Cartesian coordinates and generalized quality parameters of components

序号	构件名称	连体基	坐标 $q_i$	广义质量参数
B1	深松铲	$C_1$	$(x_1, y_1, \varphi_1)$	$m_1 = 35.2 \text{ kg}, J_1 = 2.662 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
B2	左地轮	$C_2$	$(x_2, y_2, \varphi_2)$	$m_2 = 25 \text{ kg}, J_2 = 5.585 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
B3	右地轮	$C_3$	$(x_3, y_3, \varphi_3)$	$m_3 = 25 \text{ kg}, J_3 = 5.585 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
B4	下拉杆	$C_4$	$(x_4, y_4, \varphi_4)$	$m_4 = 7.8 \text{ kg}, J_4 = 3.104 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
B5	机体	$C_5$	$(x_5, y_5, \varphi_5)$	$m_5 = 100 \text{ kg}, J_5 = 8 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
B6	上拉杆	$C_6$	$(x_6, y_6, \varphi_6)$	$m_6 = 10 \text{ kg}, J_6 = 1.896 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$
B7	机架	$C_7$	$(x_7, y_7, \varphi_7)$	$m_7 = 68 \text{ kg}, J_7 = 7.022 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$

表 2 构件约束关系

Tab. 2 Constraint relations of components

H	类	B( $\alpha$ )	B( $\beta$ )	约束个数
H1	滑移铰	B5	B0	2
H2	转动铰	B5	B4	2
H3	转动铰	B5	B6	2
H4	转动铰	B4	B7	2
H5	转动铰	B6	B7	2
H6	转动铰	B3	B7	2
H7	转动铰	B2	B7	2
H8	转动铰	B7	B1	2
H9	力约束	B1	B7	
H10	驱动约束	B5	B0	1

B7 之间为弹簧力约束。

利用 Lagrange 方法建立多体系统的动力学方程<sup>[16]</sup>,其一般形式可表示为

$$M \ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = F \quad (6)$$

式中  $M$ ——广义质量矩阵

$F$ ——广义力矩阵

$\lambda$ ——拉格朗日乘子

将系统参数代入动力学方程(6)中得

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \\ \ddot{q}_4 \\ \ddot{q}_5 \\ \ddot{q}_6 \\ \ddot{q}_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_{1q5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{2q4} & \Phi_{2q5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_{3q5} & \Phi_{3q6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_{4q5} & 0 & 0 & \Phi_{4q7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_{5q6} & \Phi_{5q7} \\ 0 & 0 & \Phi_{6q3} & 0 & 0 & 0 & \Phi_{6q7} \\ 0 & \Phi_{7q2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_{7q7} \\ \Phi_{8q1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_{8q7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Phi_{9q5} & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \\ F_7 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(5)、(6)合并成一个矩阵就组成了由广义坐标法表示的受约束多体系统的动力学矩阵式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi_q^T \\ \Phi_q & \mathbf{O} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 1.3 动力学方程组求解

多体系统动力学方程组为微分代数方程组(DAEs),该方程组的求解采用广义坐标分块算法将其转化为微分方程组。

广义坐标分块算法将位置坐标  $\mathbf{q}$  用相关坐标  $\mathbf{u}$  和独立坐标  $\mathbf{v}$  分块表示,广义坐标速度  $\dot{\mathbf{q}}$ 、加速度  $\ddot{\mathbf{q}}$  用相关坐标速度  $\dot{\mathbf{u}}$  和独立坐标速度  $\dot{\mathbf{v}}$  以及相关坐标加速度  $\ddot{\mathbf{u}}$  和独立坐标加速度  $\ddot{\mathbf{v}}$  来表示,分块坐标代入式(4)得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{M}_{uv} \\ \mathbf{M}_{vu} & \mathbf{M}_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_u^T \\ \Phi_v^T \end{bmatrix} \lambda = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_u \\ \mathbf{Q}_v \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_u \\ \Phi_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{v}} \end{bmatrix} = \gamma \quad (10)$$

式中  $\mathbf{M}_{uu}$ 、 $\mathbf{M}_{uv}$ 、 $\mathbf{M}_{vu}$ 、 $\mathbf{M}_{vv}$ ——广义质量矩阵的分块矩阵

$\Phi_u$ 、 $\Phi_v$ —— $\Phi$  对应的雅可比矩阵的分块矩阵

$\mathbf{Q}_u$ 、 $\mathbf{Q}_v$ ——广义力矩阵的分块矩阵

设  $s_v = \dot{\mathbf{v}}$ , 并将其代入式(6)、(7)中,将二阶微分方程组转换为一阶微分方程,即

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{s}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_v \\ \hat{\mathbf{M}}^{-1} \hat{\mathbf{F}} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} v(0) \\ s_v(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 \\ \dot{v}_0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

其中  $\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{M}_{vv} - \mathbf{M}_{vu} \Phi_u^{-1} \Phi_v - \Phi_v^T (\Phi_u^{-1})^T (\mathbf{M}_{uv} - \mathbf{M}_{uu} \Phi_u^{-1} \Phi_v)$   
 $\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{F}_v - \mathbf{M}_{vu} \Phi_u^{-1} \gamma - \Phi_v^T (\Phi_u^{-1})^T (\mathbf{F}_u - \mathbf{M}_{uu} \Phi_u^{-1} \gamma)$

式中  $v(0)$ ——广义独立位置坐标初值

$s_v(0)$ ——广义速度坐标初值

公式(11)为带初值的一阶微分方程组,采用亚当斯-莫尔顿校正算法,求解独立坐标的速度和位置,进而获得非独立坐标的速度、位置以及其他动力学参数,从而完成多体系统动力学正问题的求解。

## 2 离散元建模

### 2.1 土壤颗粒建模

由于土壤颗粒非常小,其中黏粒的上限为 0.002 mm,使用实际颗粒大小仿真是不现实的。因此,在一些研究中普遍使用比实际粒径大的颗

粒<sup>[13,17-18]</sup>。综合考虑仿真精度与计算总时长,仿真所用土壤颗粒半径  $r$  为 10 mm,颗粒采用网格法生成,颗粒的密度  $\rho$  为 1 800 kg/m<sup>3</sup>,土槽尺寸为 2 m × 1.4 m × 0.4 m,生成土壤颗粒总体数量为 13 万个,如图 3 所示。

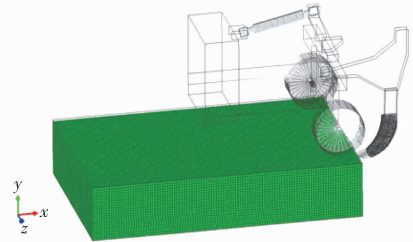


图3 耕作土壤模型

Fig. 3 Soil model

### 2.2 湿颗粒法向接触力学模型

离散元法需要选择适当的接触模型和准确的模型参数才能获得精确的仿真结果<sup>[19-20]</sup>。根据耕作土壤物理特性,提出一种适合于土壤等湿颗粒间的接触力学模型,该模型考虑了土壤的毛细作用力和动态粘性力,在颗粒间引入法向黏附力。在此模型中,当颗粒在时刻  $t$  时法向叠合量  $\delta_X^{(t)}$  大于设定值,粒子间会产生斥力;当颗粒在时刻  $t$  时法向叠合量  $\delta_X^{(t)}$  小于设定值,颗粒间会产生一定大小的法向黏附力;而当  $\delta_X^{(t)}$  小于黏附极限时,颗粒之间的黏附力将会消失,具体计算公式如下:

(1) 当  $\delta_X^{(t)} > \delta_c + \Delta$ , 法向接触力为(斥力)

$$\mathbf{F}_X^{(t)} = \mathbf{F}_{XK}^{(t)} + \mathbf{F}_{XD}^{(t)} \quad (12)$$

$$\mathbf{F}_{XK}^{(t)} = -K_X (\delta_X^{(t)} - \delta_c - \Delta) \quad (13)$$

其中  $\mathbf{F}_{XD}^{(t)} = -C_X \Delta u_X^{(t)} / \Delta t$  (14)

$$K_X = K_{X1} K_{X2} / (K_{X1} + K_{X2}) \quad (15)$$

$$C_X = C_{X1} C_{X2} / (C_{X1} + C_{X2}) \quad (16)$$

式中  $\delta_c$ ——接触时法向粘附距离

$\Delta$ ——分离时最大吸引力调节距离

$\mathbf{F}_X^{(t)}$ —— $t$  时刻接触两体间法向(沿局部坐标系  $X$  轴)作用力

$\mathbf{F}_{XK}^{(t)}$ ——接触时法向(沿局部坐标系  $X$  轴)弹性力

$K_X$ ——接触时法向刚度

$K_{X1}$ 、 $K_{X2}$ ——接触两体的法向刚度

$\mathbf{F}_{XD}^{(t)}$ ——接触时法向(沿局部坐标系  $X$  轴)阻尼力

$C_X$ ——接触法向粘性阻尼系数

$C_{X1}$ 、 $C_{X2}$ ——接触两体的法向粘性阻尼系数

$\Delta u_X^{(t)}$ ——两体接触处的法向相对位移

$\Delta t$ ——计算时步

(2) 当  $\delta_c + \Delta \geq \delta_X^{(t)} \geq \Delta$  时,法向接触力为(吸引

力)  

$$F_X^{(t)} = K_C (\delta_X^{(t)} + \Delta - \delta_X^{(t)}) \quad (17)$$

其中  $K_C = K_{C1} K_{C2} / (K_{C1} + K_{C2}) \quad (18)$

式中  $K_C$ ——接触时法向粘附系数  
 $K_{C1}、K_{C2}$ ——接触两体的法向粘附系数

(3) 当  $-\delta_B + \Delta \leq \delta_X^{(t)} < \Delta$  时, 法向接触力(吸引力)为

$$F_X^{(t)} = K_B (\delta_B^{(t)} - \Delta + \delta_X^{(t)}) \quad (19)$$

式中  $K_B$ ——分离时法向粘附系数  
 为了保证法向力数值连续变化应取

$$K_B = K_C \delta_C / \delta_B \quad (20)$$

式中  $\delta_B$ ——分离时法向粘附距离

(4) 当  $-\delta_B + \Delta > \delta_X^{(t)}$  时, 有  $F_X^{(t)} = 0 \quad (21)$

接触模型参数通过前期试凑法确定, 取值如表 3 所示。

表 3 接触力学参数  
 Tab. 3 Contact mechanical parameters

序号	参数	数值	序号	参数	数值
1	(颗粒间)静摩擦系数 $\mu$	0.5	14	(颗粒与边界间)静摩擦系数 $\mu'$	0.5
2	(颗粒间)滑动摩擦系数 $\mu_d$	0.5	15	(颗粒与边界间)滑动摩擦系数 $\mu'_d$	0.5
3	(颗粒间)滚动摩擦系数 $\mu_r$	0.3	16	(颗粒与边界间)滚动摩擦系数 $\mu'_r$	0.3
4	(颗粒间)X 向刚度 $K_X / (N \cdot mm^{-1})$	10 000	17	(颗粒与边界间)X 向刚度 $K'_X / (N \cdot mm^{-1})$	16 000
5	(颗粒间)Y 向刚度 $K_Y / (N \cdot mm^{-1})$	8 000	18	(颗粒与边界间)Y 向刚度 $K'_Y / (N \cdot mm^{-1})$	12 000
6	(颗粒间)Z 向刚度 $K_Z / (N \cdot mm^{-1})$	8 000	19	(颗粒与边界间)Z 向刚度 $K'_Z / (N \cdot mm^{-1})$	12 000
7	(颗粒间)X 向阻尼系数 $C_X / (N \cdot s \cdot mm^{-1})$	20	20	(颗粒与边界间)X 向阻尼系数 $C'_X / (N \cdot s \cdot mm^{-1})$	20
8	(颗粒间)Y 向阻尼系数 $C_Y / (N \cdot s \cdot mm^{-1})$	20	21	(颗粒与边界间)Y 向阻尼系数 $C'_Y / (N \cdot s \cdot mm^{-1})$	20
9	(颗粒间)Z 向阻尼系数 $C_Z / (N \cdot s \cdot mm^{-1})$	20	22	(颗粒与边界间)Z 向阻尼系数 $C'_Z / (N \cdot s \cdot mm^{-1})$	20
10	(颗粒间)法向粘附系数 $K_B / (N \cdot mm^{-1})$	7 000	23	(颗粒与边界间)法向粘附系数 $K'_B / (N \cdot mm^{-1})$	3 000
11	(颗粒间)法向粘附距离 $\delta_C / mm$	2	24	(颗粒与边界间)法向粘附距离 $\delta'_C / mm$	2
12	(颗粒间)最大吸引力调节距离 $\Delta / mm$	0	25	(颗粒与边界间)最大吸引力调节距离 $\Delta' / mm$	0
13	(颗粒间)分离时法向粘附距离 $\delta_B / mm$	2	26	(颗粒与边界间)分离时法向粘附距离 $\delta'_B / mm$	2

### 3 DEM-MDB 耦合算法与计算过程

DEM-MDB 耦合算法通过 DEM 模块和 MDB 模块分别计算颗粒系统动力学和机械系统动力学。程序通过接触检测判断每一个时步下颗粒与边界是否接触, 进而根据叠合量计算颗粒和边界的作用力, 该作用力被传递给 DEM 模块和 MDB 模块, 程序通过时步迭代完成余下所有计算。具体的计算步骤如下:

(1) MBD 模块计算当前时步各构件的运动学参数(位置、速度、加速度)和动力学参数(铰约束反力和驱动力)。

(2) DEM 模块从 MBD 模块中获取各构件的位置数据。

(3) DEM 模块计算颗粒与各构件之间的相互作用。

(4) DEM 模块开始当前时步的颗粒迭代计算。

(5) DEM 模块将步骤(4)中颗粒对构件的作用力和力矩传递给 MBD 模块, MBD 模块更新构件的运动学参数(位置、速度、加速度)和动力学参数(铰约束反力和驱动力)。

$t_{i+1} = t_i + h$ ,  $h$  为时间步长, 程序进入下一时步, 不断迭代, 直到达到计算所设置时间。计算流程如

图 4 所示。

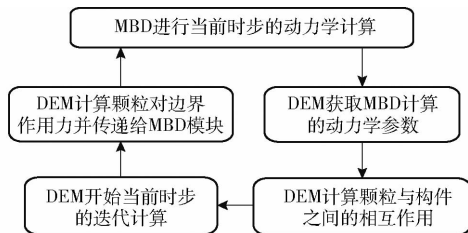


图 4 耦合算法计算流程图

Fig. 4 Coupling algorithm calculation process

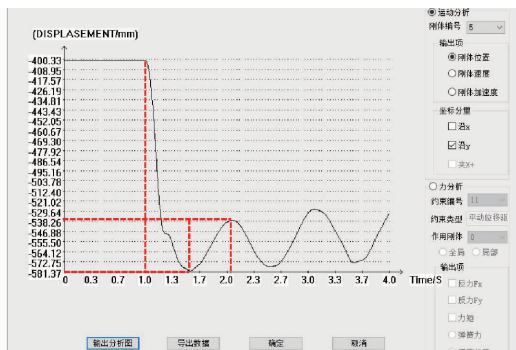
### 4 耦合仿真结果分析

#### 4.1 深松铲动力学响应分析

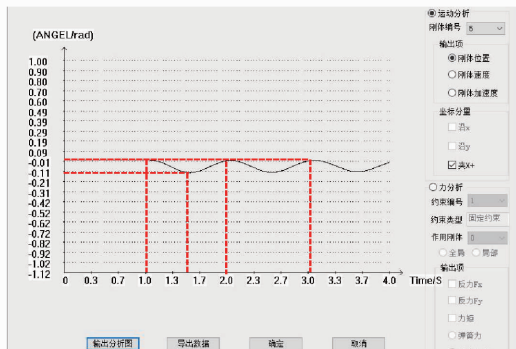
作业时, 自激振动深松机的深松铲随机具一起移动, 同时随着耕作阻力的变化, 铲柄绕铰点摆动。所以, 铲柄在平面内做复合运动, 铲柄质心上下浮动, 浮动高度  $H$  在  $-400 \sim -581$  mm, 摆动幅度为 181 mm, 摆动周期约为 1 s, 深松铲质心随时间变化输出界面如图 5a 所示。

深松铲入土角  $\theta$  随着铲柄的摆动也呈周期性变化, 区间为  $0 \sim -0.11$  rad, 其变化规律如图 5b 所示, 变化周期约为 1 s。仿真结果清晰呈现入土角的变化规律和变化范围, 为机具结构优化设计提供了依据。





(a) 铲柄Y坐标随时间的变化曲线



(b) 入土角随时间的变化曲线

图5 深松铲质心随时间变化输出界面

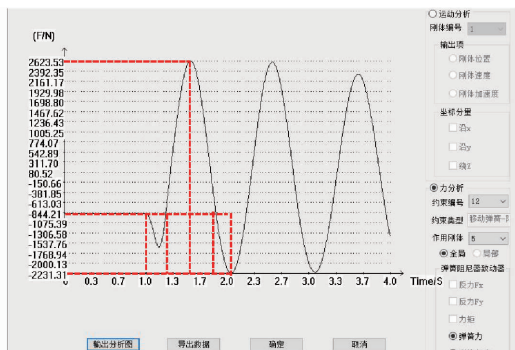
Fig.5 Centroid of subsoil shovel changes with time

### 4.2 弹簧和牵引力动力学响应分析

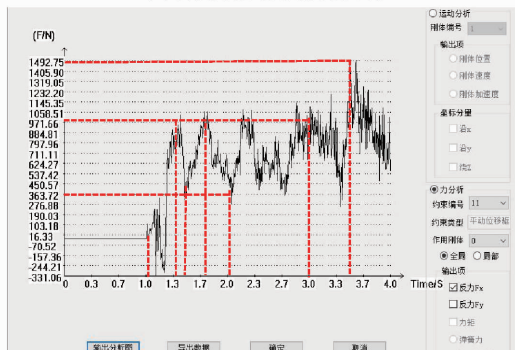
弹簧力随时间的变化曲线输出界面如图6a所示,从1~1.5 s,深松铲受到土壤颗粒逆时针方向转矩,弹簧受压作用,此时铲柄的机械能转化为弹簧弹性势能,弹簧压力达到约2 623 N;从1.5~2 s,此时弹簧作用于深松铲的顺时针方向转矩大于土壤的逆时针方向转矩,弹簧弹性势能释放,弹簧压力逐渐减小并转化为拉力,铲柄机械能转化为弹簧弹性势能,最大拉力达到约2 231 N时,弹簧受拉势能能达到最大。

牵引力随时间的变化曲线输出界面如图6b所示,1~1.3 s,随着深松铲逐渐进入土壤,耕作阻力不断增大,台车牵引力也不断增大,最大牵引力达到约1 000 N;1.3~1.5 s,深松铲逆时针转动,弹簧所受压力不断增大,耕作阻力减小到约363 N;1.5~1.75 s,弹簧压力减小,释放弹性势能,此时牵引阻力不断增大,达到约1 000 N,1.75~2 s,弹簧所受拉力逐渐增大,存储势能,牵引力不断减小到约363 N;

3.5 s时,深松阻力达到最大值1 492 N。仿真结果表明:牵引力增加时,弹簧存储势能;牵引力减小时,弹簧释放势能,结果符合自激振动深松机减阻机理。



(a) 弹簧力随时间的变化曲线



(b) 牵引力随时间的变化曲线

图6 机具受力状况输出界面

Fig.6 Machine force condition

### 4.3 土壤扰动过程分析

自激振动深松机作业过程中土壤颗粒的运动情况如图7所示,为便于观察,图中土壤做了剖面处理。色带从蓝色到橙色表示速度从0~0.2 m/s逐渐增大。

如图7a所示,限深轮与土壤接触,轮子受到土壤的支撑反力,同时土壤受到限深轮的压实作用,深松铲铲尖开始接触土壤,铲尖部分的土壤开始发生扰动。

如图7b所示,深松铲已完全进入土壤,土壤扰动范围增大,铲尖上方的土壤被抬升,铲刃将黏在一起的土壤切开,铲前方的土壤沿着前进方向扰动速度递减,铲两侧土壤扰动速度由中间向两侧递减,由图5b看出入土角趋近于最小,由图6b看出牵引力也较小。

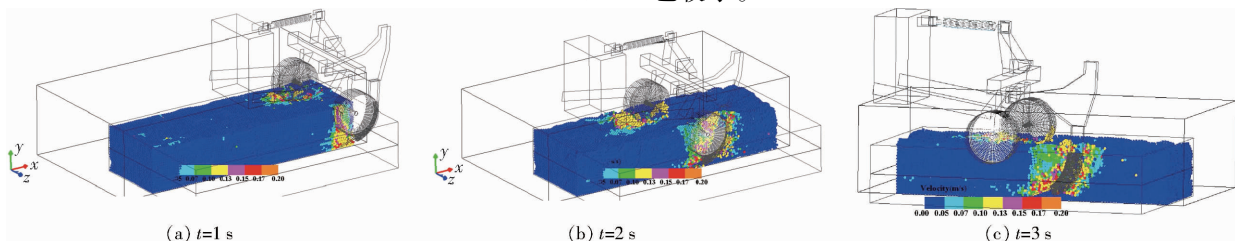


图7 不同时刻土壤扰动状态

Fig.7 Soil disturbance state at different moments

由图 7c 可以看出,深松铲入土角趋近于最大值,且牵引阻力较大,如图 5b、6b 所示,土壤颗粒颜色表明铲尖区域的扰动速度增大,铲刃附近扰动范围也有所增大,如图 7c 所示。

土壤扰动动画可以直观准确地呈现自激振动深松机松土过程及土壤颗粒的运动情况,通过不同颜色表示土壤瞬时扰动速度和扰动范围,从而评价深松铲的作业效果。

## 5 结论

(1) 利用 DEM-MBD 耦合算法,对 1S-300 型自激振动深松机在 0.5 m/s 作业速度时的作业过程进行了仿真研究。其中,通过添加的 MBD 模块建立了台车-深松机-悬挂架-土壤的系统动力学模型,利用广义坐标分块算法将系统微分代数方程组转化为微分方程组,并通过亚当斯-莫尔顿校正算法进行积分,求解获得各刚体的运动学参数和动力学参数;通过 DEM 模块建立了耕作土壤的离散元模型,考虑土壤颗粒的黏附力,提出一种适合于土壤等显颗粒间的接触力学模型,模型参数通过试凑法确定。对仿真结果进行深松铲动力学响应分析、弹簧及牵引力

响应分析和土壤扰动过程分析。

(2) 随着耕作阻力的变化,深松铲入土角随着铲柄的摆动呈周期性变化,摆角区间为  $0 \sim -0.11 \text{ rad}$ ,在高度方向上铲柄质心的变化区间为  $-400.33 \sim -581.37 \text{ mm}$ ,仿真结果清晰呈现了入土角的变化规律和变化范围,可为深松铲柄结构的优化设计提供依据。

(3) 弹簧力和牵引力都随时间周期性波动,弹簧通过形变存储和释放势能,当弹簧释放势能时,牵引力增大,当弹簧存储势能时,牵引力减小,两者密切相关,弹簧所受最大压力为 2 623 N,弹簧所受最大拉力为 2 231 N,机具牵引力周期性变化的区间为  $-331.06 \sim 1 492.75 \text{ N}$ ,仿真结果定性的解释了自激振动深松机的减阻机理。

(4) 土壤扰动动画显示,深松铲的铲尖部位抬升土壤,铲刃部分切削土壤,铲前方的土壤沿着前进方向扰动速度递减,铲两侧土壤扰动速度由中间向两侧递减,土壤颗粒沿着水平方向和垂直方向复合运动,铲尖区域的土壤颗粒扰动量最大,其次在铲刃附近。仿真结果直观的呈现了自激振动深松机的作业过程及土壤颗粒的运动情况,从而可评价深松铲的作业效果。

## 参 考 文 献

- [1] 周华,张文良,杨全军,等.滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(5):71-78. ZHOU Hua, ZHANG Wenliang, YANG Quanjun, et al. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 71-78. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190508&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190508&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.008. (in Chinese)
- [2] 袁军,王景立.自激振动深松机研究现状分析[J].中国农机化学报,2018,39(9):11-15. YUAN Jun, WANG Jingli. Research status of self-excited vibration subsoiler[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 11-15. (in Chinese)
- [3] 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 Lichun, LI Baofa. Experimental study on the self-excited vibration subsoiler for reducing draft force[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6): 72-76. (in Chinese)
- [4] 汤明军,王维新,李霞,等.自激振动深松机的设计与试验[J].江苏农业科学,2017,45(11):150-153. TANG Mingjun, WANG Weixin, LI Xia, et al. Design and experiment of self-excited vibration subsoiler[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 150-153. (in Chinese)
- [5] 崔涛,史智栋,杨丽,等.弹簧预紧力可调式振动深松机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):96-102. CUI Tao, SHI Zhidong, YANG Li, et al. Design and experiment of vibration subsoiler with adjustable spring pre-tightening force[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 96-102. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s015&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s015&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.015. (in Chinese)
- [6] 马星.自激式振动深松机设计及试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [7] 范文慧.计算机仿真有独立的生命吗?[J].系统仿真学报,2009,21(24):7982-7984. FAN Wenhui. Is computer simulation independent life?[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(24): 7982-7984. (in Chinese)
- [8] 金楠,常楚晨,王红英,等.在线近红外饲料品质监测平台设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(7):129-137. JIN Nan, CHANG Chuchen, WANG Hongying, et al. Design and experiment of online near-infrared feed quality monitoring platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 129-137. (in Chinese)
- [9] 丁力,杨丽,武德浩,等.基于 DEM-CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(11):48-57.

- DING Li, YANG Li, WU Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM - CFD coupling method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):48 - 57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181106&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181106&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.006. (in Chinese)
- [10] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 DEM - CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 50 - 60.  
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM - CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):50 - 60. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190506&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190506&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.006. (in Chinese)
- [11] 温翔宇, 贾洪雷, 张胜伟, 等. 基于 EDEM - Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3):69 - 77.  
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM - Fluent coupling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):69 - 77. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200308&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200308&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.008. (in Chinese)
- [12] 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9):62 - 72.  
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):62 - 72. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160910&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160910&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.010. (in Chinese)
- [13] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVICH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 92(1 - 2):227 - 242.
- [14] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using a full-scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160(6):140 - 153.
- [15] 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/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 60 - 67.  
LIU Jun'an, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Optimization of structural parameters of subsoiler based on soil disturbance and traction resistance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):60 - 67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170208&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170208&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.008. (in Chinese)
- [16] 洪嘉振, 刘锦阳. 机械系统计算动力学与建模[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [17] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil - tool interaction[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 118:117 - 122.
- [18] BARR J B, UCGUL M, DESBIOLLES J M A, et al. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171:1 - 15.
- [19] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121(2): 105 - 117.
- [20] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129(5):298 - 306.