

基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究

郑侃¹ 何进¹ 李洪文¹ 刁培松² 王庆杰¹ 赵宏波¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

摘要: 针对目前华北平原壤土区应用的深松铲作业阻力大、能耗高、平整度差、深松后形成的缝隙过大不利于保墒等问题, 基于耕作层、犁底层和心土层土层厚度及土壤物理性质不同, 设计了一种有效减阻降耗的折线破土刃深松铲。运用离散元法建立深松土壤模型, 设定土壤颗粒接触模型, 测定耕作层、犁底层和心土层 3 层土壤颗粒虚拟仿真参数。应用 EDEM 软件进行深松铲性能虚拟仿真, 检验了破土刃切削刃角 θ 与滑切角 φ 最优效果。相比圆弧形深松铲, 折线破土刃深松铲对土壤颗粒冲击较小, 降低了土层扰动量, 降低了牵引阻力, 地表平整度与沟槽宽度均明显优于圆弧形深松铲; 田间试验结果表明, 折线破土刃深松铲有效降低了犁底层的容重和紧实度, 比圆弧形深松铲作业阻力减少了 11.52%, 作业稳定性、可靠性较好。田间试验与仿真试验对比结果证明离散元三层深松土壤模型基本满足深松铲性能试验。

关键词: 深松铲; 破土刃; 离散元法

中图分类号: S222.12⁺9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0062-11

Research on Polyline Soil-breaking Blade Subsoiler Based on Subsoiling Soil Model Using Discrete Element Method

Zheng Kan¹ He Jin¹ Li Hongwen¹ Diao Peisong² Wang Qingjie¹ Zhao Hongbo¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: According to the existing problems of subsoilers applied in loam soil area in North-China Plain, such as high working resistance, high fuel consumption, poor surface flatness and poor soil moisture conservation due to the formation of crack after subsoiling, a polyline soil-breaking blade subsoiler which could effectively reduce working resistance and fuel consumption was designed based on the difference of soil layer thickness and physical properties among plough layer, plow pan layer and subsoil layer. Discrete element method (DEM) was used to establish soil model, the soil particle contact model was set, and virtual simulation parameters of different soil particles in plough layer, plow pan layer and subsoil layer were measured. A virtual simulation experiment on subsoiler performance was conducted using EDEM. As shown in the result, minimum working resistance was detected when the rake angle (θ) of soil-breaking blade was ranged from $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$; minimum power dissipation was obtained when the corresponding shearing angle (φ) to the higher, middle and lower parts of soil-breaking blade were 31° , 36° , 33° , respectively; when comparing with circular arc subsoiler, polyline soil-breaking blade subsoiler resulted in less impact on soil particles, reduced soil disturbance, decreased tractive resistance, significantly improved surface flatness and groove width. The field test indicated that the polyline soil-breaking blade subsoiler effectively decreased soil bulk density and compactness of plow pan layer, hence the working resistance was reduced by 11.52% with better working stability and reliability with

收稿日期: 2016-05-18 修回日期: 2016-06-09

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项资金项目(201503136)和教育部创新团队发展计划项目(IRT13039)

作者简介: 郑侃(1987—), 男, 博士生, 主要从事保护性耕作深松作业机具研究, E-mail: zhengkan0219@163.com

通信作者: 何进(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作研究, E-mail: hejin@cau.edu.cn

comparison to circular arc subsoiler. The rationality and feasibility of three-layer DEM soil model was confirmed through the comparison of field test and virtual simulation experiment, and the model could satisfy the requirement of subsoiler performance experiment.

Key words: subsoiler; soil-breaking blade; discrete element method

引言

深松是保护性耕作的核心技术之一^[1],土壤经过深松可打破坚硬的犁底层、提高水分利用效率^[2]、减少水土流失、增强水土保持能力^[3-4]、改善作物根系生长环境,有利于作物根系的生长发育,因此可以大幅度增加深根系作物的产量^[5-6]。

机械深松是华北平原壤土区深松技术主要实施方式,该地区常用的深松机多采用圆弧形深松铲或直立式深松铲,存在阻力大、能耗高、深松后形成的沟槽过大、地表不平等问题,因此减少深松作业阻力和能耗、减少沟槽宽度、增加地表平整度是推广深松技术的关键问题。常见的深松减阻方法有振动减阻法、仿生减阻法等^[7-8]。振动深松减阻法是利用机具前进同时带动深松铲进行上下振动,降低牵引杆的牵引阻力实现深松减阻,但驱动振动源需要消耗动力,并不能减少能耗^[9-10];深松铲仿生减阻法主要通过参照动物长期进化在形态、体表等多方面具有减粘脱土的特殊功能,对深松铲结构形状进行仿生实现减阻^[11-14]。离散元法在深松铲设计过程中的应用,主要是针对单层离散元土壤模型的深松铲结构与性能研究^[15-18],很少综合考虑深松土层特性。

本文通过分析华北平原壤土区耕作层、犁底层、心土层土层厚度与土壤物理性质,设计一种有效减阻降耗的折线破土刃深松铲;基于离散元虚拟仿真理论,构建离散元三层深松土壤模型;利用深松铲仿真作业性能试验检验折线破土刃深松铲设计的合理性;通过深松铲田间试验,验证离散元三层深松土壤模型建立的准确性和可行性,缩短深松机具研发周期,为低功耗深松铲的设计提供技术支撑。

1 折线破土刃深松铲设计原理

土壤质地、容重、孔隙度、体积密度、摩擦特性等物理性质影响深松作业阻力。本文基于耕作层、犁底层和心土层3层土层的土壤物理性质的不同,并以深松减阻降耗为目标,研究不同土层的深松铲破土刃最小阻力切削刃角以及最优破土刃滑切角 φ (破土刃曲线上任意一点的法线与该点运动速度方向之间的夹角),从而设计出一种折线破土刃深松铲。如图1所示的折线破土刃深松铲主要结构包

括:深松铲柱、铲尖以及上、中、下段破土刃组成的折线破土刃。折线破土刃深松铲工作过程为:深松铲在拖拉机牵引力的作用下匀速运动,上段破土刃对耕作层中根茬、土壤以及表层秸秆进行滑切破碎,中段和下段破土刃分别对犁底层和心土层土壤挤压、滑切破碎。

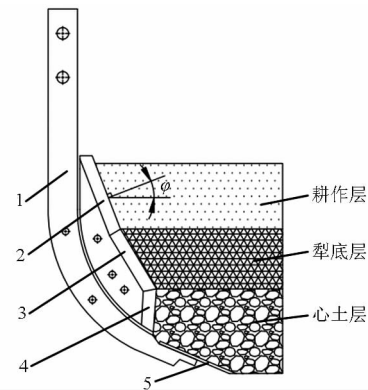


图1 折线破土刃深松铲结构示意图

Fig. 1 Structure of polyline soil-breaking blade subsoiler

1. 深松铲柱 2. 上段破土刃 3. 中段破土刃 4. 下段破土刃
5. 铲尖

2 折线破土刃关键结构参数设计

2.1 各段破土刃高度、刃厚、切削刃角参数确定

根据国家现代玉米产业技术体系对土壤耕层状况调查^[19-20],全国平均犁底层厚度为120 mm(容重平均为1.52 g/cm³),本文研究所在的黄淮海地区耕层深度为172 mm,同时结合在华北平原涿州壤土区对土壤耕层的多点测定,并考虑华北平原近年来旋耕整地导致的耕作层变浅、犁底层上移的情况^[21-22],因此土壤耕层深度取为150 mm,犁底层厚度取为120 mm。为了使上段破土刃对表层秸秆和浅层根茬有滑切作用,减少秸秆缠绕,图2中上段破土刃高度 H_1 设为200 mm;中段破土刃高度 H_2 增加了一定的预留量,设为150 mm;设计下段破土刃向下滑切,使其对心土层土壤有下压趋势,减少心土层土壤的上移量,高度设为60 mm。同时将破土刃厚度 S 与深松铲柱厚度设计相同,以减少结构突变引起的阻力,厚度 S 均取为25 mm。

切削刃角 α 会影响深松作业效果,切削刃角 α 过大对土壤挤压严重,增加土壤压实,同时增大深松后垂直缝隙,造成水分蒸发,不利于保墒^[23];切削刃角 α 过小,刃口的强度削弱、磨损加剧,影响破土刃

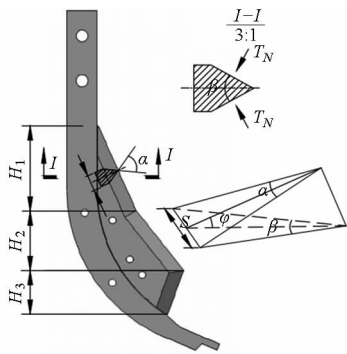


图 2 折线破土刃结构图

Fig. 2 Structure of polyline soil-breaking blade

使用寿命。假设破土刃切削为纯切削^[24],破土刃结构分析如图 2 所示,取上段破土刃刃口建立受力平衡方程,刃口受到的切削阻力 $P^{[25]}$ 为

$$P = 2T_N \left(\sin \frac{\beta}{2} + \mu_k \cos \frac{\beta}{2} \right) \tag{1}$$

其中 $\frac{\beta}{2} = \arctan \left(\tan \frac{\alpha}{2} \cos \varphi \right)$

$$T_N = \frac{KH_1S}{\cos \varphi \sin \frac{\alpha}{2}}$$

- 式中 T_N ——刃面上的法向力
 β ——切削刃角的投影角
 α ——切削刃角,取值范围 $0^\circ \sim 180^\circ$
 μ_k ——土壤与破土刃刃口的滑动摩擦因数
 K ——土壤变形比阻

式(1)中刃口切削阻力 P 与 K 、 H_1 、 μ_k 、 α 、 φ 有关。在其它条件不变情况下,滑动摩擦因数 μ_k 越大刃口受到的切削阻力 P 越大;在每一土层中,若土壤变形比阻 K 、滑动摩擦因数 μ_k 、破土刃厚度 S 、滑切角 φ (φ 取值范围 $0^\circ \sim 90^\circ$) 等条件一定情况下,则该土层对应的刃口切削阻力 P 与切削刃角 α 有关。文中通过干筛法测量试验区土壤质地为轻壤土(石砾 12.08%、砂粒 62.42%、粉粒 22.65%、粘粒 2.78%),深松铲柄切削刃角一般取值为 $30^\circ \sim 60^\circ$,其中壤土的最小阻力切削刃角 α 取值范围 $40^\circ \sim 45^\circ$ ^[26-27]。金属粗糙度、土壤质地、土壤含水率、土壤有机质含量等因素影响金属-土壤摩擦因数大小^[28-29],经测定试验区耕作层($0 \sim 150 \text{ mm}$)、犁底层($150 \sim 270 \text{ mm}$)、心土层($> 270 \text{ mm}$)土壤含水率分别为 7.54%、11.45%、14.6%;土壤有机质含量分为 2.68%、0.31%、0.09%,因此 3 层土壤与破土刃的摩擦因数不同。本文综合考虑土壤有机质、土壤水分、土壤质地等因素,利用 MXD-01 型摩擦因数测量仪确定试验区 3 层土壤与对应的上、中、下段破土刃的滑动摩擦因数分别为 0.282、0.535、0.385。因此,为了降低刃口的磨损,减少切削阻力,

同时增加对耕作层秸秆、根茬的滑切,本设计上段破土刃切削刃角取 40° 、中段破土刃切削刃角取 45° 、下段破土刃切削刃角取 42° 。

2.2 各段破土刃最优滑切角确定

破土刃滑切角 φ 越大,破土刃越容易破土,但土壤颗粒相对破土刃滑过的距离也会增大,当滑切角 φ 过大时,破土刃与土壤之间的相对摩擦功耗也会增大,破土总功耗则增加^[30-31]。为了确定华北平原西北壤土区土壤耕层中耕作层、犁底层、心土层对应的上、中、下 3 段破土刃最优滑切角大小,需研究破土刃破土功耗与滑切角的关系方程。首先分析任意一段破土刃破土时土壤受力和运动情况,破土刃前方接触的土壤中取 1 mm^3 的土块 A (边长 $h = 1 \text{ mm}$) 作为研究对象,并以深松铲运动为参照建立 xy 坐标系,如图 3a 所示。破土刃在拖拉机的牵引下沿 x 轴运动,土块 A 相对破土刃的运动由沿 x 轴的牵连运动和相对破土刃斜向上的运动组成,建立土块 A 运动方程

$$\begin{cases} N - F_x \cos \varphi = ma_e \cos \varphi \\ F_x \sin \varphi - \tau = ma_r - ma_e \sin \varphi \\ \tau = N \tan \theta \end{cases} \tag{2}$$

- 式中 N ——土块 A 受破土刃的法向力
 F_x ——周围土壤颗粒对土块 A 产生的 x 轴方向摩擦力
 m ——土块 A 质量
 a_e ——土块 A 牵连加速度,深松铲沿 x 轴匀速运动, a_e 为 0
 τ ——土块 A 沿破土刃滑动受到的切向阻力
 a_r ——土块 A 相对破土刃的加速度
 θ ——土壤与破土刃的滑动摩擦角

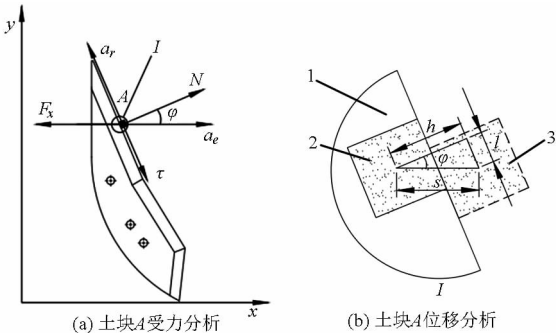


图 3 土块 A 的受力与位移分析

Fig. 3 Mechanical and displacement analysis of clod A

1. 破土刃 2. 破土后土块 A 3. 刚接触的土块 A

其次,分析上述作用在土块 A 上的各个力做功位移(图 3b)。假设 3 层土层内土壤各向同性以及破土刃破土时土块 A 相对地表静止。可根据图中的几何关系以及位移公式得到:土块 A 相对破土刃

运动距离 s 为 $h/\cos\varphi$, 其中 h 为土块 A 边长; 土块的滑移距离 l 是由于相对加速度 a_r 使土块 A 相对滑切刃运动产生的, 滑移距离 $l = h\tan\varphi = a_r t^2/2$, 其中破土刃完成对土块 A 的切割所用时间 t 为 s/v , 其中 v 为深松铲作业速度。最后, 根据上述各个力和位移求出破土刃破土时的总功耗, 其中破土刃共切割 $H/(h\cos\varphi)$ 个土块数, 总功耗 W_z 为

$$W_z = \frac{Hmv^2 \sin(2\varphi) (1 + \sec^2\varphi + \tan\theta \tan\varphi)}{h\cos\varphi (\tan\varphi - \tan\theta)} \quad (3)$$

式(3)中上段破土刃破土功耗 W_z 与破土刃高度 $H(H_1、H_2、H_3$ 分别为 200 mm、150 mm、60 mm)、土块 A 质量 m 、深松铲作业速度 v 、滑切角 φ 、土壤与破土刃的滑动摩擦角 θ 及土块厚度 h 有关。可根据 3 层土壤体积密度确定 1 mm³ 土块 A 的质量 m , 经过测量试验区耕作层、犁底层、心土层, 深度分别为 0 ~ 150 mm、150 ~ 270 mm、大于 270 mm 范围内的密度平均值为 1.54、1.82、1.73 g/cm³。拖拉机行走速度 v 设定为 4 km/h。结合 2.1 节中 3 层土壤与 3 段破土刃摩擦因数($\mu_k = \tan\theta$), 滑切角 φ 需满足滑切条件: $\varphi < 90^\circ - \theta$ ^[32], 因此定义滑切角 φ 取值范围为 $0^\circ \sim 61.85^\circ$, 通过计算得到上段、中段和下段破土刃破土功耗 W_z 最小对应的最优滑切角 φ 分别为 $30.96^\circ、36.09^\circ、33.37^\circ$, 为了便于加工取整数为 $31^\circ、36^\circ、33^\circ$ 。

3 离散元三层深松土壤模型建立

结合田间实际土壤, 用离散元法建立耕作层、犁底层、心土层 3 层深松土壤模型, 为后续的深松铲虚拟仿真试验做准备。本文采用离散元软件 EDEM 进行深松铲仿真试验, 建立合适的深松土壤接触模型, 同时为了准确反映深松铲的作业性能, 需确定离散元仿真参数。

3.1 离散元土壤接触模型与本征参数确定

接触模型是离散元法的重要基础, 其实质是准静态下颗粒固体的接触力学弹塑性分析结果^[33]。接触模型的分析计算直接决定了颗粒所受的力和力矩的大小, 对不同的仿真对象, 须建立不同的接触模型, 以提高仿真结果的准确性。离散元单元法中, 颗粒 i 在运动过程中主要受两种力作用, 即自身重力 $m_i g$ 、颗粒间或者颗粒与深松铲法向碰撞接触力 $F_{n,ij}$ 、法向阻尼 $F_{n,ij}^d$ 、切向碰撞力 $F_{\tau,ij}$ 、切向阻尼 $F_{\tau,ij}^d$ 。根据牛顿第二定律, 颗粒 i 的线性运动与转动方程为^[34]

$$\begin{cases} m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{n,ij} + F_{n,ij}^d + F_{\tau,ij} + F_{\tau,ij}^d + F_{coh,ij}) \\ I_i \frac{dw_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_{\tau,ij} + T_{r,ij}) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $F_{coh,ij} = k_{coh,ij} A_{coh,ij}$
式中 I_i ——颗粒 i 的转动惯量
 n_i ——与颗粒 i 接触的颗粒总数
 v_i ——颗粒 i 移动速度
 w_i ——颗粒 i 角速度
 $T_{\tau,ij}$ ——颗粒 i 受切向力形成的力矩
 $T_{r,ij}$ ——颗粒 i 滚动力矩
 $F_{coh,ij}$ ——法向结合力
 $k_{coh,ij}$ ——粘附能量密度
 $A_{coh,ij}$ ——颗粒接触面积

$F_{coh,ij}$ 根据颗粒是否有粘聚力进行设定。试验区土壤为轻壤土, 具有散粒体物料特性, 颗粒表面粘附力较小(粘粒 2.78%), 且表现出一定的压缩性, 因此确定 Hertz - Mindlin (no slip) 为土壤与深松铲之间的接触模型; 设定土壤颗粒之间的接触模型为: 使土壤颗粒塑性变形的 Hysteretic Spring 接触模型和添加一个法向粘聚力的 Linear Cohesion 接触模型。仿真本征参数经过测量及参考相关文献可得^[35-38]: 土壤颗粒半径 10 mm、土壤颗粒尺寸分布 0.95 ~ 1.05、土壤颗粒泊松比 0.3、土壤颗粒密度 2 500 kg/m³、土壤剪切模量 1 MPa、土壤颗粒阻尼系数 0.95、土壤颗粒刚度 0.05、深松铲材料泊松比 0.3、深松铲材料密度 7 865 kg/m³、深松铲材料剪切模量 7.9×10^{10} Pa。

3.2 土壤颗粒接触参数确定

试验区中耕作层、犁底层和心土层土壤物理性质差别较大。耕作层中常年进行秸秆粉碎、旋耕作业, 土壤容重较小; 犁底层是长期受到表土作业机械的打击、挤压和降水时粘粒随水沉淀后形成, 土壤透气、透水性差, 质地较为紧实; 心土层保持开垦种植前自然土壤淀积层的形态和性状。分别对 3 层土壤颗粒接触参数标定, 保证了离散元法研究土壤深松过程中的准确性。

仿真过程中所使用的土壤颗粒之间的恢复系数、颗粒与深松铲的恢复系数参考文献[35]均取为 0.6。土壤颗粒其它接触参数的确定采用三因素五水平二次旋转正交组合试验设计, 以土壤颗粒间静摩擦因数 A_0 、土壤颗粒间滚动摩擦因数 B_0 、土壤颗粒间粘聚能量密度 C_0 为因素, 选择土壤仿真堆积角和运行时间为试验指标, 分别对 3 层土壤颗粒进行标定。

测得试验区内耕作层、犁底层、心土层(深度分别为 0 ~ 150 mm、150 ~ 270 mm、大于 270 mm)的土壤堆积角平均值为 $31.6^\circ、40.87^\circ、36.32^\circ$ 。结合室内试验和单因素试验确定轻壤土静摩擦因数为 0.25 ~ 0.6、滚动摩擦因数为 0.05 ~ 0.25、轻壤土颗

粒间粘聚能量密度为 $0 \sim 18\,000\text{ J/cm}^3$ 。仿真试验共进行 20 次(零水平试验重复 6 次)。利用 Design-Expert 软件,采用期望函数法(Desirability function)实现双目标优化,以实际测量的试验区耕作层、犁底层、心土层土壤堆积角大小和仿真运行时间最短为目标,得到最优的土壤颗粒最佳参数如表 1 所示。

表 1 仿真试验标定结果

土层	试验指标		试验因素		
	堆积角/ (°)	最短仿真 时间/ s	颗粒间 静摩擦 因数	滚动摩擦 因数	颗粒间粘聚 能量密度/ ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-3}$)
耕作层	31.60	3.141	0.33	0.14	6 439.07
犁底层	40.87	3.511	0.35	0.21	11 799.72
心土层	36.32	3.279	0.33	0.17	9 005.42

利用 MXD-01 型摩擦因数测量仪对试验区内耕作层、犁底层、心土层土壤颗粒与破土刃之间的静摩擦因数和滚动摩擦因数进行测定。如图 4a 所示,测定土-刃静摩擦因数时,采用粘结剂将土壤颗粒均匀粘固在移动铁块(65Mn 钢)的下表面,粘结剂粘结土壤颗粒的同时不影响土壤颗粒与固定铁块的接触,打开测量仪移动铁块匀速运动,试验完成后读取土-刃静摩擦因数;如图 4b 所示,测定土-刃滚动摩擦因数时,将土壤颗粒均匀地铺放在固定铁块上,测量仪运行后移动铁块在土壤颗粒上匀速运动,运动结束后读取土-刃滚动摩擦因数。通过上述测量方法对试验区耕作层、犁底层、心土层土壤与对应的破土刃之间的摩擦因数进行测定,多次重复后,求取平均值得出结果为:滚动摩擦因数分别为 0.107、0.130、0.078,静摩擦因数分别为 0.313、0.639、0.427。

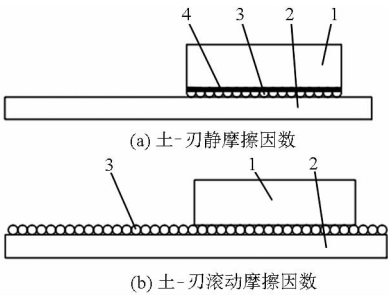


图 4 土-刃摩擦因数测定示意图

Fig. 4 Sketch map of soil-blade friction coefficient measurement

1. 移动铁块 2. 固定铁块 3. 土壤颗粒 4. 粘结剂

3.3 土壤仿真模型与深松铲几何模型的建立

通过 3 层土壤接触模型及仿真参数的测定,建立 $2\,300\text{ mm}$ (长) $\times 1\,000\text{ mm}$ (宽) $\times 600\text{ mm}$ (高)离散元轻壤土虚拟土槽,为了减少各层仿真土壤与实

际对应的土层土壤密度的误差,文中虚拟土槽 $0 \sim 150\text{ mm}$ 深度的土壤颗粒采用随机排列; $150 \sim 270\text{ mm}$ 深度的土壤颗粒采用面心立方结构(孔隙率 25.9%)排列;深度大于 270 mm 的土壤颗粒采用体心立方(孔隙率 32%)排列,仿真共生成 183 094 个土壤颗粒。

折线破土刃深松铲采用 65Mn 钢加工,选用凿形铲尖,入土角为 23° 。其它结构参数符合 JB/T 9788—1999《深松铲和深松铲柄》。结合上述折线破土刃深松铲参数,应用 SolidWorks 软件创建不同参数的折线破土刃深松铲几何仿真模型,并将几何仿真模型导入 EDEM 中。仿真土槽和深松铲几何模型如图 5 所示。

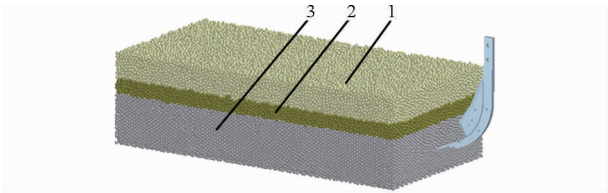


图 5 仿真土槽与折线破土刃深松铲几何模型

Fig. 5 Simulation soil bin and geometric model of polyline soil-breaking blade subsoiler

1. 耕作层 2. 犁底层 3. 心土层

4 仿真

经上述理论设计出上、中、下段破土刃最小阻力切削刃角 θ 为 40° 、 45° 、 42° ,以及最优功耗的滑切角 φ 为 31° 、 36° 、 33° 。利用建立的离散元 3 层深松土壤模型对折线破土刃深松铲进行仿真试验。检验破土刃切削刃角 θ 以及滑切角 φ 的最优效果;通过增加圆弧形深松铲对比仿真试验,测定土层扰动、牵引阻力、地表平整度、沟槽宽等指标,验证折线破土刃结构设计的合理性,并为后续判断 3 层深松土壤模型仿真的准确性做准备。在保证深松仿真过程中土壤颗粒运动连续前提下,设定固定时间步长为 $8 \times 10^{-6}\text{ s}$,为 Rayleigh 时间步长的 0.5%,总仿真时间为 2 s 、网格单元尺寸为 3 倍的最小颗粒半径。深松铲耕深设为 350 mm 、前进速度设为 4 km/h 。

4.1 最优切削刃角 α 与滑切角 φ 验证仿真

4.1.1 破土刃最小阻力切削刃角 α 验证

为了验证破土刃最小阻力切削刃角 α 取值范围以及最优值,首先根据上述最优破土刃滑切角理论设计值,设置 3 段破土刃滑切角分别为 31° 、 36° 、 33° ;其次将上、中、下段破土刃切削刃角 α 大小均设定相同;最后依据深松铲柄切削刃角取值范围为 $30^\circ \sim 60^\circ$,以 2.5° 为间距等分创建出 α 为 30.0° 、 32.5° 、 35.0° 、 37.5° 、 40.0° 、 42.5° 、 45.0° 、 47.5° 、

50.0°、52.5°、55.0°、57.5°、60.0°共 13 种不同切削刃角的折线破土刃深松铲,进行深松铲牵引阻力仿真试验对比。将不同切削刃角的折线破土刃深松铲几何模型导入 EDEM 软件中运行,利用 EDEM 软件中的图表绘制和数据输出功能(Create Graph 模块)取工作平稳段,得到各个深松铲破土刃的牵引阻力平均值,如图 6 所示。

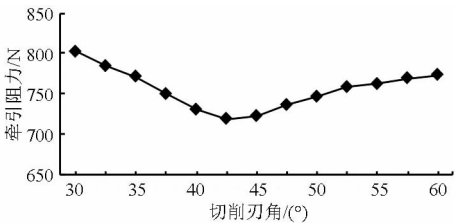


图 6 不同切削刃角时破土刃平均牵引阻力变化曲线
Fig.6 Average draft force of soil-breaking blade with different cutting angles

由图 6 可知,深松铲破土刃牵引阻力平均值随着刃角的增加呈现先减小后增大趋势,当刃角在 40°~45°范围时对应的深松铲破土刃牵引阻力最小,对应值为 730.268 N、722.346 N。该范围与 2.1 节设计破土刃最小阻力切削刃角 α 的取值范围一致。考虑田间实际情况,并针对不同土层摩擦特性,以及根茬、秸秆、杂草分布等特点,设计上、中、下段破土刃切削刃角为 40°、45°、42°,通过验证仿真试验可得深松铲破土刃牵引阻力为 717.154 N,小于图 6 的最小值(当 α 为 42.5°)718.884 N。

4.1.2 折线破土刃最小功耗滑切角 φ 验证

根据土壤与钢板的摩擦因数取值范围为 0.1~1^[39-40],代入式(3)可求得功耗最小时,滑切角 φ 为 24.98°~42.42°,为了检验折线破土刃滑切角取 31°、36°、33°时功耗最小,综合考虑滑切角 φ 取值范围、深松铲结构等因素,以最优值为中心,将 3 段破

土刃滑切角依次增加 3°、6°和减少 3°、6°,得到如图 7a 所示的 5 种深松铲。深松铲的上段、中段、下段破土刃切削刃角分别取最优的 40°、45°、42°。如图 7b 所示,利用 EDEM 软件网格单元组划分功能(Grid Bin Group 模块),随机选取厚度为 s_0 ($s_0 = 250$ mm)的土槽分析区域。破土刃仿真试验时,破土刃与该区域土壤颗粒刚接触时记为初始位置;当破土刃进入该区域土壤作业时,记录破土刃受到该区域土壤颗粒的牵引阻力 $F_i(s)$;当破土刃后端脱离该区域时为终结位置,破土刃作业位移为 s_i 。可求得破土刃破土功耗为

$$\begin{cases} W_i = \int_0^{s_i+s_0} F_i(s) ds \\ s_i = H_1 \tan \varphi_{1i} + H_2 \tan \varphi_{2i} \end{cases} \quad (5)$$

式中 W_i ——第 i 个破土刃破土功耗
 s_i ——第 i 个破土刃作业位移
 φ_{1i} ——第 i 个破土刃上段对应的滑切角
 φ_{2i} ——第 i 个破土刃中段对应的滑切角

结合图 7a、7b 及公式(5),求得不同滑切角破土刃破土功耗与阻力,如图 7c 所示。不同滑切角深松铲在宽为 s_0 区域作业时,该区域土壤颗粒对破土刃的平均牵引阻力,随着滑切角 φ 的增加呈现先减小后增大趋势,第 3 种深松铲作业时,破土刃平均牵引阻力最小为 440.885 N;滑切角 φ 逐渐增加,深松铲破土刃作业功耗是先减小后增大,在第 3 种深松铲作业时破土刃破土功耗最小,为 168.334 N·m。综上分析可得上、中、下段破土刃滑切角取 31°、36°、33°时功耗为最小值。验证了 2.2 节理论设计的最优滑切角正确性。

4.2 折线破土刃深松铲与圆弧形深松铲对比仿真

4.2.1 深松铲作业土层扰动对比

进行圆弧形深松铲对比仿真。两种深松铲作业

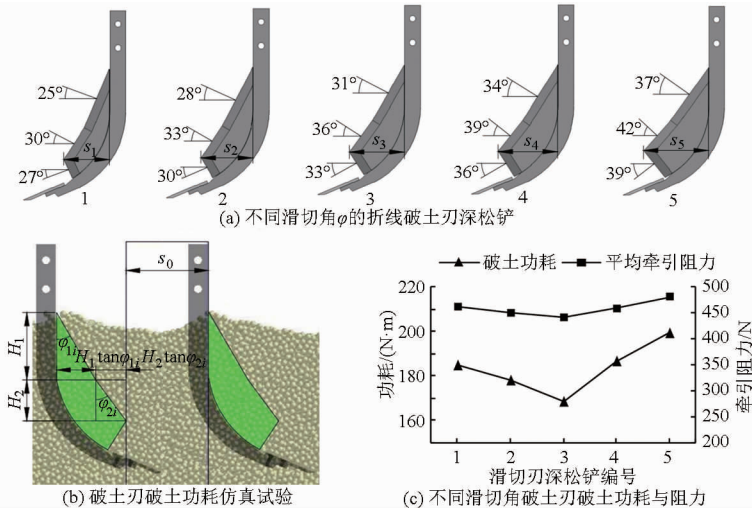


图 7 最优滑切角 φ 验证仿真结果

Fig.7 Validation result of simulation on optimum shearing angle φ

时,土壤颗粒受力运动如图 8a 所示,红色线代表颗粒受力较大,蓝色线代表颗粒受力较小,绿色线介于两者之间,曲线代表颗粒轨迹。由图 8a 可知,相比圆弧形深松铲,折线破土刃深松铲破土时破土刃对土壤颗粒冲击较小(图 8a 中绿色部分较少),其中上段破土刃作业的耕作层、中段破土刃作业的犁底层对比较为明显,说明破土刃对土壤起到滑切作用;两种深松铲铲尖对土壤颗粒冲击差异不明显。由图 8b 土层扰动对比可知,折线破土刃深松铲比圆弧形深松铲降低了耕作层、犁底层、心土层土壤的混合量,达到了不乱土层的效果。下段破土刃对心土层起到了下压作用,减少了养分含量较低的心土层土壤上移,更有利于作物生长。

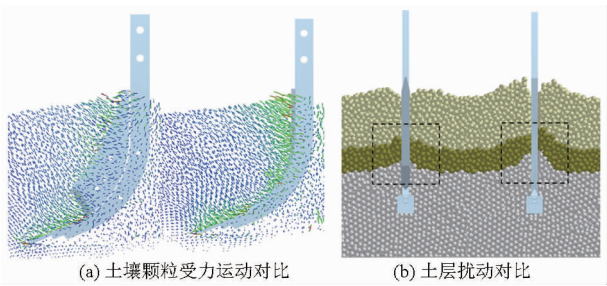


图 8 两种深松铲仿真过程
Fig. 8 Simulation process of different subsoilers

4.2.2 牵引阻力

分析折线破土刃深松铲与圆弧形深松铲对牵引阻力的影响,取两种深松铲作业平稳时段,得到深松铲牵引阻力如图 9 所示。从图 9 可知,两种深松铲牵引阻力随时间变化呈现出不规律的上下浮动,总体趋势而言,折线破土刃深松铲牵引阻力曲线位于圆弧形深松铲铲柄曲线上方,折线破土刃深松铲牵引阻力平均值为 1 692.88 N,圆弧形深松铲牵引阻力平均值为 1 868.68 N,牵引阻力平均降低了 10.38%。结果表明折线线破土刃深松铲有效降低了牵引阻力。

4.2.3 地表平整度与沟槽宽度

为了测定两种深松铲对地表平整度与沟槽宽度的影响,利用 EDEM 软件截断功能(Clipping 模块)沿垂直于深松铲前进方向,对仿真土槽进行区域划

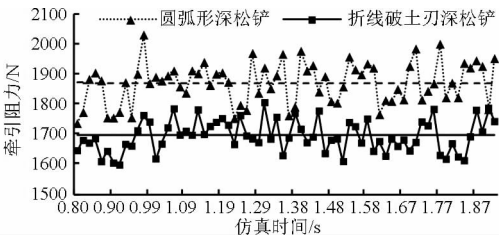


图 9 折线破土刃深松铲与圆弧形深松铲牵引阻力对比
Fig. 9 Draft force comparison of polyline soil-breaking blade subsoiler and circular arc subsoiler

分,随机选取一个厚度为 100 mm、高度为 750 mm 切片网格,如图 10a 所示。提取该区域上述两种深松铲作业前、后地表颗粒稳定后的坐标值,将坐标值导入 CAD 中,绘制出深松前地表线和两种深松铲深松后地表线。并在折线破土刃深松铲与圆弧形深松铲深松后地表线上,过最高点作一条水平直线作为基准线,如图 10b 所示。在整个深松铲深松宽度 L_0 范围以 d_0 (为 30 mm) 等分标记测点,在两种深松铲作业前、后,以各等分测点测定深松前、后至水平基准线的垂直距离。计算出平均值和标准差^[41]为

$$\left\{ \begin{aligned} a_k &= \frac{\sum_{j=1}^{n_k} a_{kj}}{n_k} \\ S_k &= \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_k} (a_{kj} - a_k)^2}{n_k - 1}} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式中 a_k ——第 k 次测量的深松前、后地表至水平基准线的垂直距离
 a_{kj} ——第 k 次测量中第 j 个等分点的深松前、后地表至水平基准线的垂直距离
 n_k ——第 k 次测量中的测试点数
 S_k ——第 k 次测量的地表平整度

以标准差表示地表平整度;深松铲深松后沟槽呈“V”型,分别取两侧最高点,测量圆弧形深松铲沟槽宽 L_1 与折线破土刃深松铲沟槽宽 L_2 。上述试验分别测量 5 次求平均值。

测定求得未深松地表平整度均值 2.24 mm;折线破土刃深松铲作业地表平整度均值 15.11 mm;圆

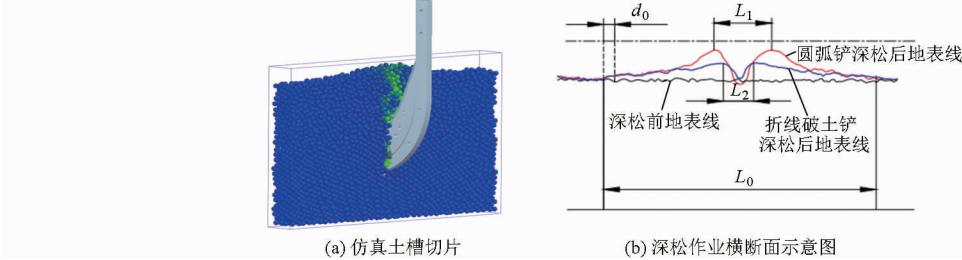


图 10 地表平整度与沟槽宽度测定示意图

Fig. 10 Sketch map of soil bulking intensity and soil-bin width measurement

弧形深松铲作业地表平整度均值 23.94 mm。折线破土刃深松铲作业地表平整度明显优于圆弧形深松铲,更适用于保护耕作条件下的深松整地。折线破土刃深松铲作业形成的沟槽宽均值为 159.7 mm,明显小于圆弧形深松铲沟槽宽 255.32 mm,更有利于保墒。

5 田间试验

5.1 试验目的、条件与方法

5.1.1 试验目的

对上述理论设计、仿真验证得到的最优折线破土刃深松铲进行加工制造,通过田间试验对比分析折线破土刃深松铲田间试验与仿真试验中地表平整度、沟槽宽、牵引阻力等指标误差,用以判断三层深松土壤模型建立的准确性和可行性;对比分析折线破土刃深松铲与圆弧形深松铲作业后土壤容重、紧实度、牵引阻力等指标变化,检验深松铲破土刃设计的合理性。

5.1.2 试验条件

试验地域选定在黄淮海地区小麦-玉米一年两熟区,地点为河北省涿州市东城坊镇(115°56'E、39°28'N)中国农业大学河北北部耕地保育科学观测实验站,试验区土壤质地为轻壤土。试验仪器主要包括雷沃 M904 型拖拉机、安装折线破土刃深松铲的深松机、安装圆弧形深松铲的深松机、田间综合测试车、环刀 1 把、土壤盒 60 个、电热恒温干燥箱 1 台、紧实度仪、卷尺等。

5.1.3 试验方法

选取地势平坦、长度为 200 m、宽度为 30 m 的试验地块,设定前、后 50 m 为调试区,中间 100 m 为工作平稳区。利用田间综合测试车测量深松铲的阻力^[42],田间综合测试车与机具平均作业速度 v 为 4 km/h,深松铲平均作业深度为 350 mm,采样周期为 0.1 s。

分别用环刀取 0~150 mm、150~270 mm、大于 270 mm 深度的土壤,用恒温干燥箱在 105℃ 条件下干燥 8 h,测量深松前后土壤容重;用紧实度仪分别测量深松前后 0~150 mm、150~270 mm、大于 270 mm 深度的紧实度;深松前后地表平整度、沟槽宽度按 4.2 节进行测定。

5.2 试验结果及分析

两种深松铲田间试验与仿真试验结果如图 11 所示。折线破土刃深松铲田间试验与仿真试验结果对比如表 2 所示。测量得到两种深松铲牵引阻力如图 12 所示,作业前、后土壤容重、紧实度试验结果如表 3 所示。

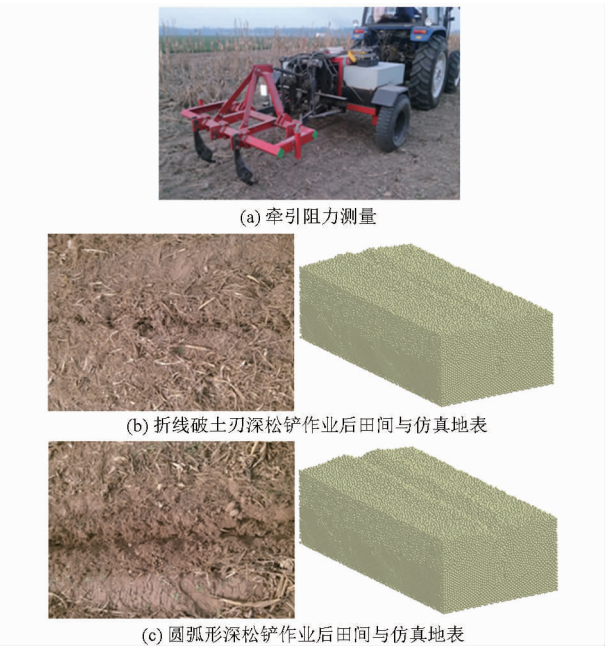


图 11 田间试验与仿真试验结果对比
Fig. 11 Result comparison of field test and simulation experiment

表 2 折线破土刃深松铲田间试验与仿真试验结果
Tab. 2 Field test and simulation experiment results of polyline soil-breaking blade subsoiler

	测定项目(均值)		
	深松前地表平整度/mm	深松后地表平整度/mm	沟槽宽度/mm
田间试验	8.44	23.32	195.50
仿真试验	2.24	15.11	159.72
误差	6.20	8.21	35.78

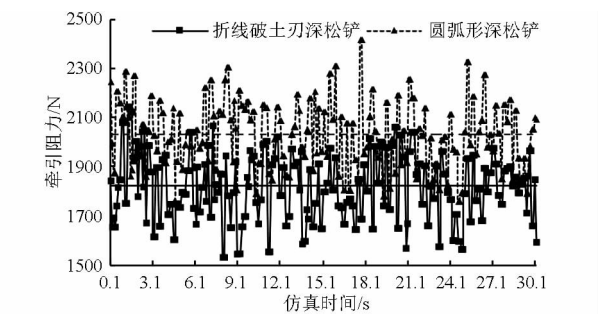


图 12 牵引阻力实测对比
Fig. 12 Comparison of drag force measurement

表 3 深松前后土壤容重和紧实度田间测量结果
Tab. 3 Result of surface flatness and groove width before and after subsoiling

类型	容重/(g·cm ⁻³)			紧实度/kPa		
	0~150 mm	150~270 mm	>270 mm	0~150 mm	150~270 mm	>270 mm
深松前	1.432	1.633	1.509	756.833	5 224.800	5 012.467
折线破土刃深松铲	1.282	1.405	1.476	539.143	3 352.733	4 641.733
圆弧形深松铲	1.265	1.395	1.448	495.950	3 179.667	4 844.993

5.2.1 离散元 3 层深松土壤模型准确性分析

由表 2 的折线破土刃深松铲田间试验与仿真试验结果对比可知,田间试验与仿真试验地表平整度误差 8.209 mm、沟槽宽误差 35.78 mm;由图 12 和图 9 可得到,两种深松铲田间试验与仿真试验牵引阻力曲线的变化趋势基本相同,其中折线破土刃深松铲牵引阻力田间测量均值 1 821.5 N,与仿真均值误差为 128.62 N;圆弧形深松铲均值为 2 031.26 N,误差为 162.58 N。分析误差存在的原因:①与离散元仿真相比,田间作业地表平整度较差,降低了机具作业稳定性,影响了地表平整度。②离散元深松土壤模型为土壤颗粒,未考虑秸秆和根茬。③田间作业过程中,根茬、表层覆盖的秸秆与杂草缠绕在深松铲上,增加了牵引阻力。其中圆弧形深松铲缠绕较严重,牵引阻力误差较大。④根茬与秸秆分布不均匀,增加了折线破土刃深松铲作业后形成的沟槽宽度。⑤深松铲田间作业中,拖拉机作业速度在 3.84 ~ 4.13 km/h 范围内浮动,无法精确控制在 4 km/h,其变化影响了深松铲作业效果。总体而言,虚拟仿真结果与田间试验结果基本一致,说明了离散元土壤颗粒接触模型设定、仿真参数确定以及三层深松土壤模型建立能较好的模拟深松铲松土过程,基本满足深松铲性能试验。

5.2.2 折线破土刃深松铲牵引阻力分析

由表 3 测定结果可知,折线破土刃深松铲与圆弧形深松铲作业后,0 ~ 270 mm 深度土壤的容重、紧实度均有明显降低,且差异较小。其中在 150 ~ 270 mm 深度的犁底层,土壤容重分别降低了 0.228 g/cm³ 和 0.238 g/cm³;土壤紧实度分别降低了 1 872.067 kPa 和 2 045.133 kPa,由此说明了两种深松铲均有效降低了犁底层的容重和紧实度,且折线破土刃深松铲不会影响深松作业效果。

由图 12 两种深松铲牵引阻力实际测量结果可得到,折线破土刃深松铲牵引阻力比圆弧形深松铲牵引阻力平均降低了 11.52%。经仿真分析,折线破土刃深松铲降低了对土壤颗粒的冲击,从而减少了深松铲的牵引阻力;由田间试验可知,折线破土刃深松铲比圆弧形深松铲作业稳定性好,破土刃减少了秸秆、根茬的缠绕,拖拉机未出现打滑现象,作业后形成的沟槽较窄(图 9b)。上述分析表明,与圆弧形深松铲相比,折线破土刃深松铲在不影响深松作业效果的前提下,有较好的减阻效果。

6 结 论

(1)基于华北平原壤土区耕作层、犁底层和心土层土层厚度不同以及土壤质地、容重、孔隙度、体积密度、摩擦特性等土壤物理性质差异,设计了一种折线破土刃深松铲,可有效减少牵引阻力、增加地表平整度与沟槽宽度。

(2)采用虚拟样机理论,设定适用于轻壤土的土壤接触模型,确定耕作层、犁底层和心土层土壤接触参数和土壤颗粒排列。应用离散元 EDEM 软件,建立耕作层、犁底层和心土层的三层离散元深松土壤模型,进行深松虚拟仿真试验,检验了折线破土刃深松铲最优切削刃角 α 与滑切角 φ 设计的合理性;与圆弧形深松铲相比,降低了土层的扰动、提高了地表平整度、减小了沟槽宽度。

(3)田间试验结果表明,离散元三层深松土壤模型的建立及仿真基本满足深松铲性能试验;折线破土刃深松铲有效降低了犁底层的容重和紧实度;与圆弧形深松铲相比,折线破土刃深松铲牵引阻力平均降低了 11.52%。研制的折线破土刃深松铲可应用于华北平原壤土区,离散元三层深松土壤模型的建立可为土壤耕作机具的研究提供参考。

参 考 文 献

- 何进,李洪文,高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10): 62-67.
HE Jin, LI Hongwen, GAO Huanwen. Subsoiling effect and economic benefit under conservation tillage mode in Northern China [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(10):62-67. (in Chinese)
- TAO Zhiqiang, SUI Peng, CHEN Yuanquan, et al. Subsoiling and ridge tillage alleviate the high temperature stress in spring maize in the north China plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(12): 2179-2188.
- 金轲,蔡典雄,吕军杰,等. 耕作对坡耕地水土流失和冬小麦产量的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(4): 1-5.
JIN Ke, CAI Dianxiong, LÜ Junjie, et al. Effects of tillage practices on erosion and winter wheat yield on sloping dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 1-5. (in Chinese)
- 王建政. 旱地小麦保护性耕作对土壤水分的影响[J]. 中国水土保持科学,2007,5(5): 71-74.
WANG Jianzheng. Influence of protective farming on soil water of wheat field[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(5): 71-74. (in Chinese)
- HU Hengyu, NING Tangyuan, LI Zengjia, et al. Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen water use and yield of different varieties of maize in northern China[J]. Field Crops Research, 2013, 142(3): 85-94.
- RAPER R L, REEVES D W, SHAW J N, et al. Benefits of site specific subsoiling for cotton production in coastal plain soils[J].

- Soil and Tillage Research, 2007, 96(1): 174–181.
- 7 张祥彩,李洪文,王庆杰,等. 我国北方地区机械化深松技术的研究现状[J]. 农机化研究,2015,37(8): 261–264.
ZHANG Xiangcai, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Research status on mechanized subsoiling technology in northern China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(8): 261–264. (in Chinese)
- 8 张金波,王跃辉,李宝成,等. 深松耕作仿生减阻技术研究[J]. 现代化农业,2015(5): 53–54.
- 9 LI Xia, ZHANG Dongxing. The research and analysis of anti-drag mechanism for vibratory subsoiler[C]//International Conference on New Technology of Agricultural Engineering(ICAE), 2011.
- 10 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. Experiment study on the self excited vibration subsoiler for reducing draft force[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6): 72–76. (in Chinese)
- 11 朱凤武,佟金. 土壤深松技术及高效节能仿生研究的发展[J]. 吉林大学学报:工学版,2003,33(2): 95–99.
ZHU Fengwu, TONG Jin. Development of high efficient and energy saving bionic subsoiling techniques[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2003, 33(2): 95–99. (in Chinese)
- 12 李磊,张荣英,陈海燕. 仿生深松铲发展现状与展望[J]. 农机化研究,2015(2): 265–268.
LI Lei, ZHANG Rongying, CHEN Haiyan. The development of bionic subsoilers and outlooks [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(2): 265–268. (in Chinese)
- 13 VAN DER LINDE Jaco. Discrete element modeling of a vibratory subsoiler[D]. Stellenbosch, ZA: University of Stellenbosch, 2007.
- 14 LI Bo, CHEN Ying, CHEN Jun. Modeling of soil claw interaction using the discrete element method DEM [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 158: 177–185.
- 15 KORNEL Tamas, ISTVAN J Jori, ABDUL M Mouazen. Modelling soil sweep interaction with discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 134(8): 223–231.
- 16 SHMULEVICH I. State of the art modeling of soil tillage interaction using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 111(1): 41–53.
- 17 SHAHGOLI G, SHAHI N. Modeling of soil and oscillatory tine interaction using discrete element method [J]. Journal of Agricultural Machinery Science, 2011, 7(3): 271–275.
- 18 李博,刘凡一,陈军,等. 深松铲耕作阻力影响因素的离散元法仿真分析[J]. 农机化研究,2015,37(2): 71–74.
LI Bo, LIU Fanyi, CHEN Jun, et al. DEM simulation on analyzing affecting factors of the soil resistance applied on the subsoiler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(2): 71–74. (in Chinese)
- 19 李霞. 振动深松减阻机理及试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2013.
LI Xia. Study on mechanism of traction reduction and experiment vibrating subsoiling[D]. Beijing:China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 20 刘振朝. 深松对玉米养分吸收及土壤养分分布的影响[D]. 北京:中国农业大学,2013.
LIU Zhenchao. Effect of subsoiling on nutrient absorption of maize and soil nutrient distribution[D]. Beijing:China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 21 石彦琴,高旺盛,陈源泉,等. 耕层厚度对华北高产灌溉农田土壤有机碳储量的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(11):85–90.
SHI Yanqin, GAO Wangsheng, CHEN Yuanquan, et al. Effect of topsoil thickness on soil organic carbon in high-yield and irrigated farmland in north China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 85–90. (in Chinese)
- 22 李轶冰,逢焕成,杨雪,等. 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响[J]. 生态学报,2013,33(23):7478–7486.
LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7478–7486. (in Chinese)
- 23 朱瑞祥,张军昌,薛少平,等. 保护性耕作条件下的深松技术试验[J]. 农业工程学报,2009,25(6):145–147.
ZHU Ruixiang, ZHANG Junchang, XUE Shaoping, et al. Experimentation about subsoiling technique for conservation tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 145–147. (in Chinese)
- 24 余泳昌,刘文艺,赵迎芳,等. 立柱式深松铲受力数学模型及试验分析[J]. 农业工程学报,2007,23(6): 109–113.
YU Yongchang, LIU Wenyi, ZHAO Yingfang, et al. Force mathematical model and examination analysis of the column subsoiler [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 109–113. (in Chinese)
- 25 许春林,李连豪,赵大勇. 北方大型联合整地机设计与试验[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014:45–46.
- 26 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:北京科学技术出版社,1990.
- 27 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 28 姚禹肃,曾德超. 金属土壤摩擦阻力与滑动速度关系的研究[J]. 农业机械学报,1988,19(4): 33–39.
YAO Yusu, ZENG Dechao. Investigation on the relationship between sliding speed and soil metal friction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1988, 19(4): 33–39. (in Chinese)
- 29 STAFFORD J V, TANNER D W. Effect of rate on soil shear strength and metal friction II soil metal friction[J]. Soil and Tillage Research, 1983, 3(3): 321–330.

- 30 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报, 1982, 6(1): 64–69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982, 6(1): 64–69. (in Chinese)
- 31 权龙哲. 玉米根茬收获模式及采收机理[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
QUAN Longzhe. Corn stubble harvest mode and mechanisms[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 32 顾耀权, 贾洪雷, 郭慧, 等. 滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 38–42.
GU Yaoquan, JIA Honglei, GUO Hui, et al. Design and experiment of sliding knife furrow opener[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 38–42. (in Chinese)
- 33 胡建平, 周春健, 侯冲, 等. 磁力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 Jianping, ZHOU Chunjian, HOU Chong, 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. (in Chinese)
- 34 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 Yanlong, JIA Fuguo, TANG Yurong, et al. Influence of granular coefficient of rolling friction on accumulation characteristics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 165–171. (in Chinese)
- 35 MUSTAFA Ucgul, JOHN M Fielke, CHRIS Saunders. Three dimensional discrete element modeling DEM of tillage accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298–306.
- 36 MUSTAFU Ucgul, JOHN M Fielke, CHRIS Saunders. 3D DEM tillage simulation validation of a hysteretic spring plastic contact model for a sweep tool operating in cohesionless soil[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 144(4): 220–227.
- 37 KORNAL Tamas, ISTVAN J Jori, Abdul M Mouazen. Modelling soil sweep interaction with discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 134(8): 223–231.
- 38 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆土壤旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60–67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw soil rotary blade system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60–67. (in Chinese)
- 39 BENKENSTEIN H, LINDNER H. Shear strength internal friction and friction between soil and metal in different soil types as affected by moisture content[J]. Albrecht Thaer Arch, 1969, 13: 351–359.
- 40 余友泰, 蒋建鹏. 土壤作物种实和各种脱出物对钢板铸铁和木板等的摩擦系数的测定[J]. 东北农学院学报, 1957(1): 1–11.
- 41 DG/T 026—2012 深松机[S]. 2012.
- 42 乔晓东, 王晓燕, 颜华, 等. 后悬挂农具田间试验平台[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 63–68.
QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyang, YAN Hua, et al. Field experiment platform for rear suspension[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 63–68. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 49 页)

- 14 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 Xia, FU Junfeng, ZHANG Dongxing, et al. Experiment analysis on traction resistance of vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 32–36. (in Chinese)
- 15 GB /T 2089—2009 普通圆柱螺旋压缩弹簧尺寸及参数(两端圈并紧磨平或制扁)[S]. 2009.
- 16 郭志军, 杜干, 周志立, 等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47–51.  
GUO Zhijun, DU Gan, ZHOU Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47–51. (in Chinese)
- 17 JB/T 9788—1999 深松铲和深松铲柄[S]. 1999.
- 18 王序俭, 黄玉芳, 秦朝民. 1LZ-5.4 联合整地机的试验与研究[J]. 农业机械学报, 1996, 27(增刊): 15–18.  
WANG Xujian, HUANG Yufang, QIN Chaomin. Theoretical and experimental research on 1LZ-5.4 tillage combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996, 27(Supp.): 15–18. (in Chinese)
- 19 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 20 GB/T 24675.2—2009 保护性耕作机械深松机[S]. 2009.
- 21 JB/T 10295—2001 深松整地联合作业机[S]. 2001.