

基于离散元法的切振共作深松机作业性能仿真分析及试验

李明生^{1,2,3}, 王元俊^{1,2}, 谢守勇^{1,2,3*}, 刘凡一^{1,2,3}, 陈行政^{1,2,3},
李相^{1,2}, 刘伟^{1,2}

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 西南农业智能装备创新中心, 重庆 400715;
3. 丘陵山区智能农机装备重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 针对深松装备应用于西南丘陵紫色土时存在作业阻力大、松土质量差、功耗高的问题, 该研究提出切振共作深松方式并设计了一种切振共作深松机。运用离散元软件对非振动深松机和切振共作深松机在相同参数下进行仿真。仿真结果显示, 切振共作方式能够有效减少深松机的耕作阻力。通过单因素试验得到切振共作深松机的最佳作业速度区间为 0.9~1.1 m/s, 最佳振动频率区间为 9~15 Hz; 通过正交试验得出深松作业最佳参数为: 作业速度 0.96 m/s、耕作深度 300.24 mm、振动频率 11.43 Hz。为了测试切振共作深松机的实际减阻性能, 结合仿真结果并参考深松作业最佳参数, 设置拖拉机前进速度 1.0 m/s, 作业深度为 300 mm, 振动频率为 9、12 和 15 Hz, 进行田间试验。结果表明: 在相同速度和耕深条件下, 切振共作深松机相较于非振动深松机均有明显的减阻效果, 耕作阻力降低 15.43%~37.56%; 功耗降低 8.87%~32.32%, 在振动频率为 12 Hz 时, 减阻效果最佳, 耕作阻力降低 37.56%, 功耗降低 32.32%, 土壤坚实度降低 74.11%, 土壤扰动系数为 56.32%, 深松深度为 309 mm, 深松深度稳定性系数为 98.16%, 深松深度及其稳定性符合行业标准。切振共作深松机减阻降耗效果明显, 可为振动深松机的优化设计提供参考。

关键词: 农业机械; 仿真; 丘陵山地; 深松机; EDEM

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405207

中图分类号: S222.12⁺9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0070-10

李明生, 王元俊, 谢守勇, 等. 基于离散元法的切振共作深松机作业性能仿真分析及试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 70-79. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405207 <http://www.tcsae.org>

LI Mingsheng, WANG Yuanjun, XIE Shouyong, et al. Simulation analysis and test of the operation performance of shear vibration co-operation subsoiler based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 70-79. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405207 <http://www.tcsae.org>

0 引言

长期以来, 旋耕机和铧式犁被广泛应用于农业耕作, 然而, 这种传统的作业方式带来了一系列问题。首先, 由于旋耕机和铧式犁浅翻作业, 土壤受到压实, 耕层逐渐变薄, 土壤板结, 并在耕层下形成一层坚硬的犁底层, 严重降低了土壤的蓄水保墒能力, 给作物的根系生长带来严重影响, 进而限制了作物的正常生长和发育, 直接影响了农业生产的稳定性和可持续性^[1-2]。为解决上述问题, 深松作业应运而生, 深松作业不仅可以提高土壤的蓄水保墒能力^[3-4]。还具有脱盐碱效果^[5]。然而, 深松作业需要高功率拖拉机进行牵引, 作业效率较低。更为重要的是, 目前振动深松作业的功耗较高, 大量试验结果表明, 现阶段振动深松作业总功耗非降反升, 且功耗随振动频率升高进一步增大。因此, 迫切需要开发高效能

的振动深松机, 以提高作业效率, 减少能量损耗, 适应不同的作业环境。这不仅对解决当前农业生产中土壤质量下降问题具有重要意义, 同时也有助于推动农业的可持续发展, 实现农业生产的高质、高效、低耗目标。

针对深松作业功耗高、耕作阻力大、效率低等问题, 许多研究人员对深松机进行了创新性设计。在仿生学方面, 邹亮亮等^[6]将液体润滑运用到深松铲上面, 验证了深松铲液体润滑减阻的可行性。SUN 等^[7]模拟分析了仿生深松铲与土壤的相互作用, 得到 6 种不同结构形式的固定深松铲在特定土壤条件下的功耗。WANG 等^[8]对仿生鲨鱼深松机与土壤的关系进行了力学分析, 以评价其耕作阻力、总功耗和土壤扰动。张鹏等^[9]以田鼠爪趾曲面轮廓为仿生原型曲线, 设计和制作了深松铲柄触土曲面的变曲率减阻结构, 试验表明设计的深松铲柄相比于圆弧铲柄最大可降低 23.82% 的耕作阻力。在振动减阻方面, 李霞等^[10-11]设计了振动深松机, 分别可降低牵引阻力 9.09%、18%、9.22%。SHAHGOLI 等^[12]通过试验研究发现, 振动深松机在振动模式下牵引阻力从 25.8 kN 降低为 9.3 kN, 但 PTO 功率从 2.5 kW 增加到 26.3 kW。GUILLE 等^[13]的研究表明, 在不同耕作速度、幅度和深度下, 振动深松的牵引阻力比非振动深松降低 50%。崔涛等^[14-15]设计了自激振动深松机, 分别可降低牵引阻力

收稿日期: 2024-05-29 修订日期: 2024-06-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52105276); 中央高校基本科研业务费重点项目 (XDJK2020B022)

作者简介: 李明生, 博士, 副教授, 研究方向为农业机械技术装备。

Email: li-ming.2004@163.com

*通信作者: 谢守勇, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业智能控制与检测。Email: xsyswu@163.com

10.30%~22.65%、15.45%~20.05%。袁军等^[16]运用农机部件数字化设计软件（agricultural discrete element method, Agri-DEM），实现了对自激振动深松机的作业过程仿真。XIN 等^[17]在 ADAMS 中进行自激振动深松机性能仿真，结果表明其性能随着振动频率和作业速度的增加而变差。肖茂华等^[18]对自激振动旋耕刀进行研究，通过土槽试验得出转速为 300 r/min 时，降阻效果最佳。综上所述，目前对于深松机牵引阻力的研究较多，而对于深松功耗方面的研究相对较少，牵引阻力不能直接反映深松功耗，因此需开展深松功耗方面的研究。

针对深松装备作业时存在耕作阻力大、功耗高的问题，本文提出了一种基于强迫振动的切振共作方式，振动深松方式由传统整体振动模式转变为局部振动模式。切振共作局部振动深松作业采用先切削、后振动的松土模式，即前深松铲固定破土，使入土角等参数始终处于最低土壤阻力位置，后振动铲绕轴振动松土，降低土壤阻力并增加松土范围和碎土效果有效降低对振动能量的消耗。

1 整机结构与切振共作工作原理

1.1 深松方式的确定

强迫振动式具有主振源，能够根据设定的振幅和频率进行振动；而自激振动式没有主振源，主要依靠作业时土壤阻力的变化引发激振部件的振动，因此受土壤环境影响较大，振动不够稳定。自激振动式振动深松机由于减阻效果较差，难以保证耕深一致性，因此目前实际应用较为有限。相比之下，强迫振动式深松技术更加成熟，具有良好的深松减阻效果，但随着振动频率和振幅的增加，功耗也会进一步上升，因此其适用性受到限制，牵引机具以大中型拖拉机为主。综合考虑以上因素，本研究在现有强迫振动式的基础上提出切振共作方式。

1.2 整机结构与技术参数

切振共作深松机主要结构如图 1 所示。深松铲由定铲和振动铲两部分组成，定铲用于固定破土，作业时可以保持入土角处于最佳作业角度；振动铲位于定铲后方，在定铲对土壤进行首次深松后，振动铲再对土壤进行振动松土，降低土壤阻力并增加松土范围和碎土效果，可有效降低耕作时的能量消耗。振动机构的振动方式对整机功耗和作业质量都有重要影响，根据目前国内外主流的振动机构，为了提高振动机构的可靠性，并使其结构简单，本文设计了一种由偏心轴、轴套和联轴器等组成的振动装置，整机的主要性能参数如表 1 所示。

切振共作深松机主要以振动装置实现振动减阻，以拖拉机 PTO（power take off）输出动力作为主振源，具体结构如图 2 所示。PTO 动力输出轴与振动装置偏心轴连接，与轴套连接的十字联轴器在偏心轴的作用下实现上下往复运动，进而带动振动拉杆运动，振动翼板通过销轴固定在铲柄底部，振动拉杆带动振动翼板绕铲柄连接处转动，实现振动松土和减阻作用。

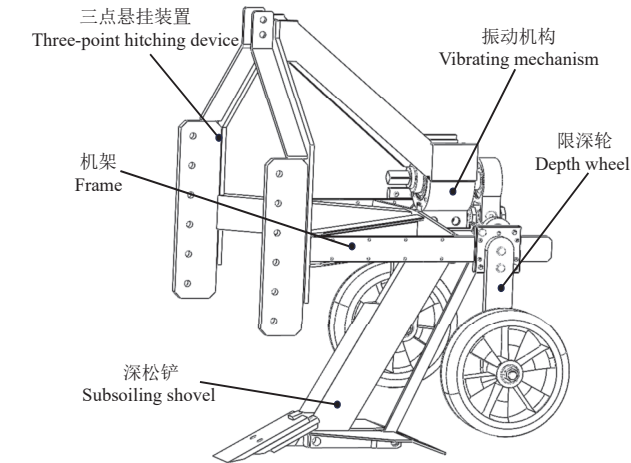


图 1 切振共作深松机
Fig.1 Shear and vibration subsoiler

表 1 切振共作深松机主要性能参数
Table 1 Main technical parameters of shear and vibration subsoiler

参数 Parameter	值 Value
整机尺寸（长×宽×高） Overall dimension (length×width×height)/mm×mm×mm	712×1 023 ×1 069
工作幅宽 Working width/mm	368
配套动力 Supporting power/kW	42
作业深度 Working depth/mm	300
整机质量 Weight of whole machine/kg	150

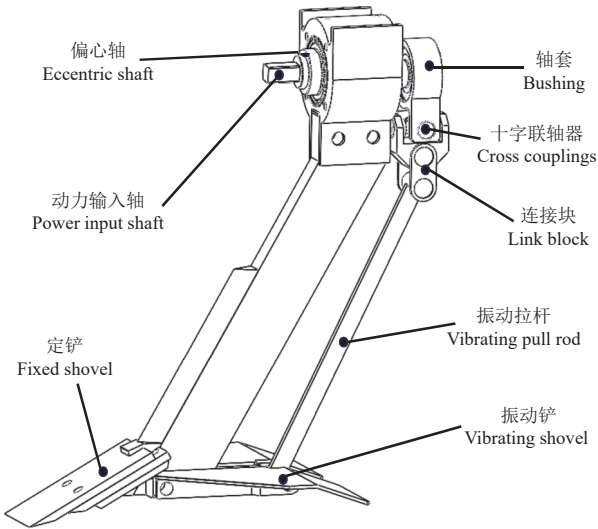


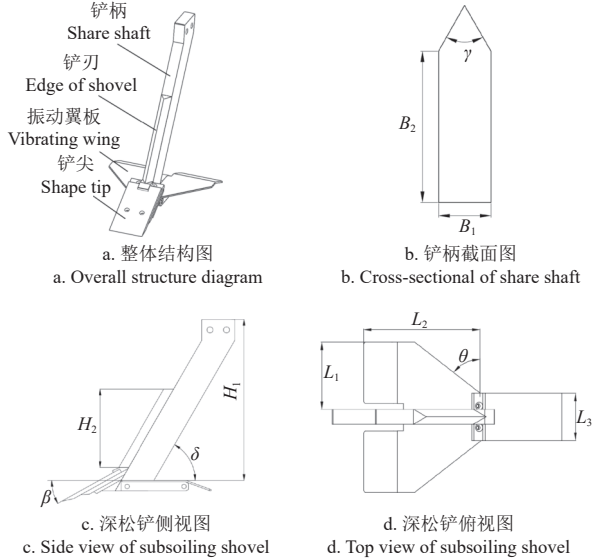
图 2 振动装置
Fig.2 Vibrating device

1.3 深松铲结构设计

根据土壤动力学模型，深松铲的受力部分包括铲尖和铲柄两部分^[19]，铲柄部分是耕作阻力的主要来源，将铲柄设计成倾斜式，可以减小深松机耕作时的耕作阻力，并能更好地掀动土壤^[20]。深松铲的材料选用 65Mn，并进行热处理和冷拔硬化，提高深松铲的强度，在铲柄底部加装 2 个对称的振动翼板，振动翼板绕轴转动，可提高土壤扰动效果。

参考 JB/T 9788-2020《深松铲和深松铲柄》并运用三维软件建立模型。深松铲模型分为定铲和振动铲，如图 3 所示，其中，定铲的作用是固定破土，为保证铲柄

强度, 设计铲柄厚度 $B_1=38$ mm, 铲柄宽度 $B_2=110$ mm, 深松铲高度 $H_1=535$ mm, 为了减小土壤与铲柄的作用力, 将铲柄与土壤接触部分设计为三角形刃口形式, 铲刃垂直高度 $H_2=260$ mm, 深松铲柄倾斜角 $\delta=60^\circ$, 为了增加土壤扰动面积, 设计铲翼宽度 $L_1=170$ mm, 铲翼长度 $L_2=290$ mm, 铲翼夹角 $\theta=52^\circ$ 。



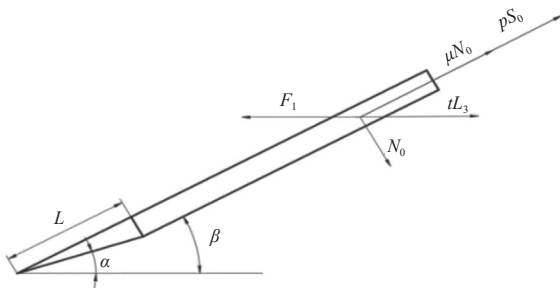
注: B_1 为铲柄厚度, mm; B_2 为铲柄宽度, mm; γ 为铲刃夹角, $(^\circ)$; H_1 为深松铲高度, mm; H_2 为铲刃高度, mm; δ 为深松铲柄倾斜角, $(^\circ)$; β 为深松铲尖倾角, $(^\circ)$; L_1 为铲翼宽度, mm; L_2 为铲翼长度, mm; L_3 为铲尖宽度, mm; θ 为铲翼夹角 $(^\circ)$ 。
Note: B_1 is the thickness of the shovel handle, mm; B_2 is the width of the shovel handle, mm; γ is the angle of the cutting edge, $(^\circ)$; H_1 is the height of the subsoiling shovel, mm; H_2 is the height of the cutting edge, mm; δ is the tilt angle of the handle of the subsoiling shovel handle, $(^\circ)$; β is the tip inclination angle of the subsoiling shovel, $(^\circ)$; L_1 is the width of the blade, mm; L_2 is the length of the shovel wing, mm; L_3 is the tip width, mm; θ is the angle of the blade, $(^\circ)$ 。

图 3 深松铲结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of subsoiling shovel structure

1.4 切振共作式深松铲受力分析

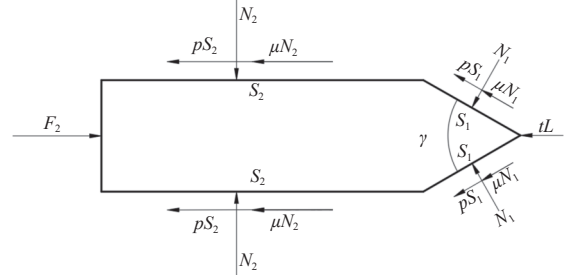
切振共作式深松铲在作业时, 主要由铲尖入土和铲柄破土, 因此分别对铲尖和铲柄部分进行受力分析, 如图 4、图 5 所示。



注: L 为铲尖长度, mm; α 为入土隙角, $(^\circ)$; F_1 为铲尖所受牵引力, N; S_0 为铲尖上端面的面积, mm^2 ; N_0 为铲尖所受正压力, N; t 为土壤的切削力, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$; S_0 为铲尖上端面的面积, mm^2 ; p 为土壤的粘附力, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$; μ 为摩擦系数。
Note: L is the length of the shovel tip, mm; α denotes the soil clearance angle $(^\circ)$; F_1 stands for the traction of the shovel tip, N; L_3 is the tip width, mm; N_0 is the positive pressure applied on the shovel tip, N; t is the cutting force of soil, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$; S_0 is the area of the upper end face of the shovel tip, mm^2 ; p is the adhesion force of the soil, $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$; μ is the friction coefficient.

图 4 铲尖受力分析示意图

Fig.4 Schematic diagram of shovel tip force analysis



注: N_1 、 N_2 为铲刃上的法向力, N; S_1 为铲柄刃口侧面面积, m^2 ; S_2 为铲柄侧面面积, m^2 ; F_2 为铲柄所受牵引力, N。

Note: N_1 , N_2 is the normal force on the cutting edge, N; S_1 is the side area of the shank cutting edge, m^2 ; S_2 is the side area of the handle, m^2 ; F_2 is the traction force exerted on the shovel handle.

图 5 铲柄受力分析示意图

Fig.5 Stress analysis diagram of shovel shaft

根据图 4 受力分析可得:

$$F_1 = N_0 \sin \beta + \mu N_0 \cos \beta + tL_3 + pS_0 \cos \beta \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 深松铲铲尖倾角 β 对深松铲作业时的牵引力具有较大影响, 铲尖倾角 β 过大会导致深松铲入土困难, 同时前进阻力也会增加; 铲尖倾角 β 过小, 虽然入土效果好、前进阻力也会有所减小, 但深松效果会变差。参考农业机械设计手册并结合西南丘陵紫色土特性, 设计深松铲铲尖倾角 $\beta=29^\circ$, 入土隙角 $\alpha=18^\circ$ 。

根据图 5 受力分析可得:

$$F_2 = tL + 2[N_1 \sin(\gamma/2) + \mu N_2 + (pS_1 + \mu N_1) \cos(\gamma/2) + pS_2] \quad (2)$$

$$N_1 = K_1 S_1 \quad (3)$$

$$N_2 = K_2 S_2 \quad (4)$$

式中 K_1 为土壤变形比阻, Pa; K_2 为土壤比压, Pa。一般情况下, 土壤的纯切削力很小, 可忽略不计, 由式 (2) ~ (4) 可知, F_2 与 K_1 、 K_2 、 p 、 γ 相关, 由于不同土壤的 K_1 、 K_2 以及 p 各不相同, 因此需要通过减小铲刃夹角 γ 来降低总阻力, 然而, 夹角过小会导致松土面积降低, 深松范围会减小, 反而影响深松效果。参考农业机械设计手册并结合西南丘陵紫色土特性, 设计深度铲最佳铲刃夹角 $\gamma=60^\circ$ 。

2 深松铲性能仿真分析

为了探究深松铲减阻降耗的最佳参数, 运用离散元软件对深松铲深松过程进行仿真分析, 通过单因素试验得出最佳作业速度区间和振动频率区间, 通过正交试验得出作业最佳参数。

2.1 紫色土壤特性

西南地区耕地主要以紫色土壤为主, 黏性高且易板结, 根据 GB/T5262—2008《农业机械试验条件 测定方法的一般规定》, 运用环刀对不同深度土壤进行取样, 取样后的土壤用保鲜袋密封。土壤坚实度用 SC900 土壤坚实度仪 (极限深度: 450 mm; 最大荷载: 10 MPa) 测量, 该仪器可以自动存储数据, 通过数据线连接电脑端可以导出数据; 土壤含水率采用 SL237-003-1999-2 烘干

法，测试仪器为卤素水分测定仪（型号：FBS-760A；精度：0.000 1 g；水分解析：0.001%），测试结果如表 2 所示。

表 2 土壤坚实度与含水率

Table 2 Soil firmness and moisture content		
土壤深度 Soil depth/mm	土壤坚实度 Soil compaction/kPa	土壤含水率 Soil moisture content/%
≥0~100	379.21	12.59
≥100~200	1 910.83	18.12
≥200~300	2 267.88	19.41

2.2 土壤颗粒和接触模型

研究表明，西南地区紫色土在田间的土壤颗粒形态主要包括球形、柱状和核状。为了模拟土壤的颗粒结构，借助 EDEM2022 软件中现有的颗粒结构，将球形单元看作为组成土壤颗粒的组成单元，建立离散元土壤颗粒模型。在离散元仿真中，仿真时间与设置的颗粒半径和颗粒数量有很大关系，颗粒过小会导致仿真时间过长，影响仿真效率^[21]。参考方会敏等^[22-23]研究，为了节约仿真时间，本文选用球形单元的半径为 5 mm；针对西南地区紫色土土壤黏重的特性，选用 Bonding 接触模型作为土壤的接触模型，Bonding 接触模型通过 bonding 键可以将球形颗粒粘结在一起，能够模拟土壤的黏结情况；bonding 键所受应力达到最大时会断裂，可根据 bonding 键的断裂情况来模拟深松过程土壤破碎情况。

2.3 仿真模型参数

确保仿真准确性的关键在于构建正确的仿真模型和设置相关参数。根据前文分析，选用 65Mn 作为深松铲的材料，仿真参数参考文献^[24]设置，土壤参数通过实际测定获得，土壤泊松比通过计算得出^[25]，其计算式为

$$\mu = K_0 / (1 + K_0) \quad (5)$$

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (6)$$

式中 μ 为泊松比； K_0 为土壤压力系数； ϕ 为土壤内摩擦角，(°)。

根据 1.3 节力学分析可知，深松铲主要受到土壤的作用力，进行深松时，土壤与深松铲直接接触。在仿真时需要对接触参数进行设置^[25]。本试验共设置 3 种土壤结构类型（耕作层、犁底层和心土层），土壤间的接触参数参考文献^[26]设置，土壤与深松铲间的接触参数参考文献^[27]设置。具体如表 3 所示。

仿真时，为了降低参数标定的数量和复杂性，根据现有研究，Bonding 接触模型对粘结刚度参数的变化并不敏感，具体数值参照参考文献^[28]设置，详细数据如表 4 所示。粘结半径 R_b 通过计算得出，计算式为

$$R_b = \sqrt[3]{(3/4v_2 + \pi R^3)/\pi} \quad (7)$$

$$v_1 = (4/3)\pi R^3 \quad (8)$$

$$v_2 = \omega \rho_1 v_1 / \rho_2 (1 - \omega) \quad (9)$$

式中 ω 为土壤含水率，%； ρ_1 为土壤密度， kg/m^3 ； ρ_2 为水分密度， kg/m^3 ； v_1 为土壤颗粒所占体积， m^3 ； v_2 为水

分所占体积， m^3 ； R 为颗粒半径，mm。

表 3 离散元仿真参数

Table 3 Parameters of discrete element simulation	
参数 Parameters	数值 Values
土槽尺寸（长×宽×高） /（mm×mm×mm）	（2 000×800×450）
65Mn 密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 830
65Mn 泊松比	0.35
65Mn 剪切模量/Pa	7.27×10^{10}
耕作层土壤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 490
耕作层土壤泊松比	0.40
耕作层土壤剪切模量/Pa	1×10^7
犁底层土壤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 670
犁底层土壤泊松比	0.42
犁底层土壤剪切模量/Pa	5.5×10^7
心土层土壤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 770
心土层土壤泊松比	0.43
心土层土壤剪切模量/Pa	7×10^7
土壤-土壤间恢复系数	0.3
土壤-土壤间动摩擦因素	0.2
土壤-土壤间静摩擦因素	0.4
土壤-65Mn 间恢复系数	0.35
土壤-65Mn 间静摩擦因素	0.5
土壤-65Mn 间动摩擦因素	0.2

表 4 粘接键仿真参数

Table 4 Sticky bond simulation parameters	
参数 Parameters	数值 Values
粘结键法向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	5×10^6
粘结键切向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	5×10^6
粘结键法向临界应力/Pa	1.5×10^4
粘结键切向临界应力/Pa	1.5×10^4
粘结半径/mm	5

2.4 土壤和深松铲模型构建

土壤模型根据西南地区紫色土土壤结构设置，分为耕作层（0~150 mm）、犁底层（150~300 mm）和心土层（300~450 mm），按照表 3 和表 4 完成参数设置后，通过颗粒工厂分时段动态生成各层土壤颗粒、自然落下，堆积生成粘结键。其中耕作层填充球状颗粒，犁底层和心土层均填充核状颗粒和柱状颗粒。为确保仿真的准确性，运用 SolidWorks2022 软件建立试验用的深松铲的数学模型，并将其保存为适用于 EDEM 的格式^[29]。仿真模型如图 6 所示。

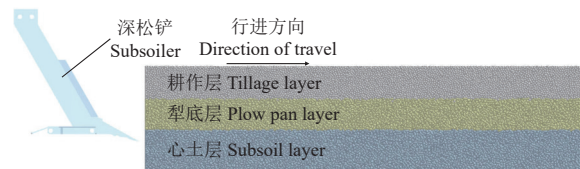


图 6 仿真模型

Fig.6 Simulation model

2.5 离散元仿真

为了探究切振共作深松机在不同作业速度和振动频率下的深松效果，设定了 3 组深松仿真，耕深为 325 mm。在没有振动的情况下，第一组设置耕作速度为 0.6 m/s（0~0.5 s）、0.7 m/s（0.5~1.0 s）、0.8 m/s（1.0~1.5 s），第二组设置耕作速度为 0.9 m/s（1.5~2.0 s）、1.0 m/s（2.0~2.5 s）、

第三组设置耕作速度为 1.1 m/s(2.5~3.0 s)、1.2 m/s(3.0~3.5 s), 选取每个作业速度中间位置, 对仿真模型进行剖面处理, 通过对比不同速度下各层土壤的混合情况和土壤扰动效果, 得出最佳速度区间。

由图 7a 可知, 各层土壤颗粒间混合情况随着作业速度的逐渐增大而逐渐减少并趋于稳定。作业速度为 0.6~0.8 m/s 时各层土壤颗粒间大量混合, 速度为 0.9~1.0 m/s 时, 各层土壤颗粒混合量明显减小, 速度为 1.1~1.2 m/s 时, 各层土壤颗粒混合量保持稳定。由图 7b 可知, 作业速度为 0.6~0.7 m/s 时, 土层基本无扰动; 速度为 0.8~0.9 m/s 时, 土层开始出现明显扰动; 速度达到 1.0 m/s 后, 扰动现象趋于稳定。

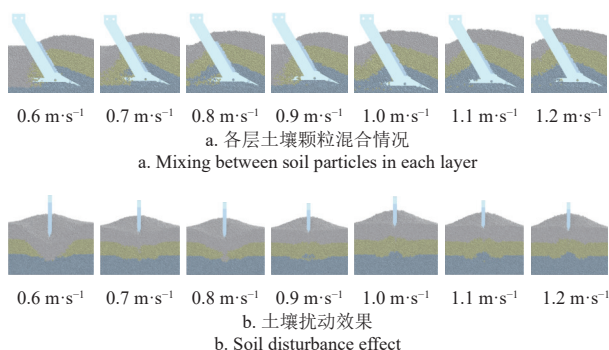


图 7 不同耕作速度下深松效果仿真结果

Fig.7 Simulation results of subsoiling effect under different tillage speeds

为了探究深松铲在不同作业速度下的耕作阻力情况, 运用仿真软件模拟实际作业过程, 仿真结果如图 8 所示, 其中速度每隔 0.5 s 从 0.6 m/s 依次递增。

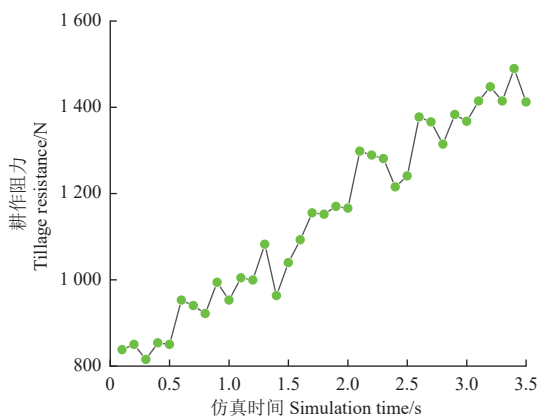


图 8 耕作阻力仿真数据

Fig.8 Tillage resistance simulation data

由图 7、图 8 可知, 随着作业速度的增加, 各层土壤之间的混合情况逐渐趋于稳定, 土壤扰动效果逐渐增大并趋于稳定, 耕作阻力逐渐增大; 这是由于土层具有一定的稳定性, 当犁底层被完全破坏后, 继续增加作业速度并不会增加土壤混合量和土壤扰动效果。前进速度在 0.9~1.1 m/s 时, 深松质量较好, 耕作阻力较低, 其耕作阻力均值为 1244.35 N, 可认为是深松铲的最佳作业速度区间。

选取最佳前进速度范围内的中间值 1.0 m/s, 耕作深度 325 mm, 设置不同的振动频率探究最佳振动频率范围。在 EDEM 中, 通过添加线性旋转运动设置不同的振动频率, 旋转轴设置在动铲和定铲连接处, 通过单位换算 ($1 \text{ Hz}=6.28 \text{ rad/s}$), 在 EDEM 中设置旋转角速度对应振动频率; 动铲的运动为绕旋转轴的上下转动, 通过在 EDEM 中设置时间循环, 实现动铲的振动, 由图 9 可知, 耕作阻力在振动频率为 9~15 Hz 时较低, 在振动频率为 12 Hz 时, 耕作阻力最低, 其耕作阻力均值为 705.62 N。

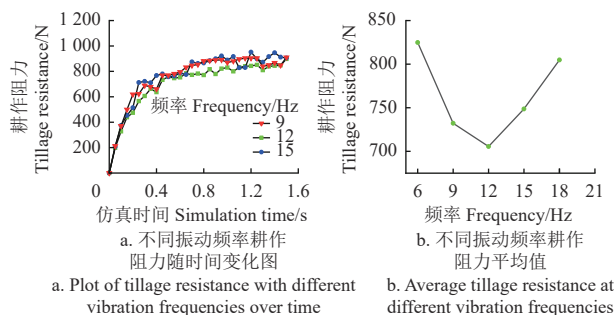


图 9 不同振动频率下的耕作阻力

Fig.9 Tillage resistance at different vibration frequencies

2.6 正交试验及结果分析

根据切振共作深松机的工作原理和仿真分析, 选取深松速度、深松深度和振动频率作为正交试验的主要因素, 由前文可知, 最佳作业速度范围为 0.9~1.1 m/s, 振动频率范围为 9~15 Hz, 因此选择作业速度水平分别为 0.9、1.0 和 1.1 m/s, 振动频率水平分别为 9、12 和 15 Hz, 此外, 犁底层主要位于地表以下 150~300 mm, 因此选择深松深度水平分别为 300、325 和 350 mm, 具体如表 5 所示。

表 5 试验因素水平表

Table 5 Test factor level table

水平 Level	作业速度 Working speed $X_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	深松深度 Subsoiling depth X_2/mm	频率 Frequency X_3/Hz
1	0.9	300	9
0	1.0	325	12
-1	1.1	350	15

2.7 正交试验结果与分析

试验结果如表 6 所示。对表 6 中数据进行方差分析, 结果如表 7 所示。

由表 7 可知, 耕作阻力的模型拟合度为极显著 ($P<0.01$), 表明回归模型靠性, 其中 X_1X_3 和 X_2X_3 对耕作阻力不显著 ($P>0.05$), 其余项对耕作阻力都为显著或及显著, 失拟项 $P=0.3057$, 不显著, 表明回归模型合理。剔除 X_1X_3 和 X_2X_3 后的回归模型为

$$Y_1 = 780.55 + 19.85X_1 + 117.64X_2 + 5.42X_3 + 9.68X_1X_2 + 6.37X_1^2 + 39.35X_2^2 + 28.64X_3^2 \quad (10)$$

绘制深松深度和作业速度对耕作阻力的响应曲面, 如图 10 所示。

以耕作阻力最低为目标, 得到最佳参数组合为: 作

业速度为 0.96 m/s，耕作深度为 300.24 mm，振动频率 11.43 Hz，此时耕作阻力最低，为 704.65 N

表 6 正交试验结果

Table 6 Orthogonal experimental results				
序号 No.	作业速度 Working speed $X_1/(m\cdot s^{-1})$	深松深度 Subsoiling depth X_2/mm	频率 Frequency X_3/Hz	耕作阻力 Tillage resistance Y_i/N
1	1.0	325	12	780.077
2	1.0	300	15	734.001
3	1.0	325	12	782.263
4	0.9	350	12	915.359
5	0.9	325	15	798.895
6	1.0	325	12	779.056
7	1.0	325	12	778.085
8	0.9	325	9	789.316
9	0.9	300	12	700.647
10	1.1	325	15	843.592
11	1.0	350	9	960.186
12	1.0	350	15	973.359
13	1.1	300	12	717.804
14	1.0	325	12	783.256
15	1.0	300	9	726.574
16	1.1	325	9	830.398
17	1.1	350	12	971.235

表 7 试验结果方差分析

Table 7 Variance analysis of test results				
方差来源 Sources of variance	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F 值 F values	P 值 P values
模型 Model	125 400	13 935.73	2 289.94	< 0.000 1
X_1	3 152.65	3 152.65	518.05	< 0.000 1
X_2	110 700	110 700	18 192.38	< 0.000 1
X_3	235.15	235.15	38.64	0.000 4
X_1X_2	374.79	374.79	61.59	0.000 1
X_1X_3	3.27	3.27	0.536 9	0.487 5
X_2X_3	8.25	8.25	1.36	0.282 4
X_1^2	170.69	170.69	28.05	0.001 1
X_2^2	6 518.62	6 518.62	1 071.15	< 0.000 1
X_3^2	3 452.68	3 452.68	567.35	< 0.000 1
残差 Residual errors	42.6	6.09		
失拟项 Lack of fit	23.81	7.94	1.69	0.305 7
纯误差 Pure errors	18.79	4.7		
总和 Total	125 500			

注： X_1 、 X_2 、 X_3 分别为作业速度、深松深度、频率的水平值， $P<0.000\ 1$ 表示影响极其显著， $0.0001\leq P<0.001$ 表示影响高度显著， $0.001\leq P<0.05$ 表示影响显著， $P>0.05$ 表示影响不显著。
Note: X_1 , X_2 , X_3 are the level values of working speed, subsoiling depth and frequency, $P<0.000\ 1$ indicated that the impact was extremely significant, $0.0001\leq P<0.001$ indicated that the impact was highly significant, $0.001\leq P<0.05$ indicated significant impact, and $P>0.05$ indicated that the impact was not significant.

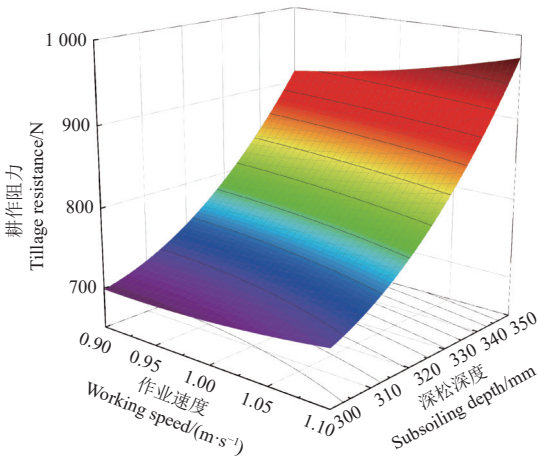


图 10 响应曲面

Fig.10 Response surface

3 田间试验

为了验证切振共作深松机的深松减阻效果，以牵引阻力和深松效果为指标，于 2024 年 3 月 3 日在重庆市璧山区七塘镇陈家湾试验田进行切振共作深松机田间试验。

试验设备主要包括沃得奥龙-WD704K 拖拉机（动力输出功率 $\geq 42.0\text{ kW}$ ）、深松机架、深松铲、中泰联创数据采集卡 EM9118B5-6（可同步采集，最高采样频率 450 KHz）、二维力传感器变送器 LZ-JX4（量程： X 、 Y 轴 1 t，供电 5 V）、拉力传感器、笔记本电脑、SC900 土壤紧实度测定仪（极限深度：450 mm；最大荷载：10 MPa）、睿斯 UPS 不间断电源（UPS10A）、卷尺等。

3.1 试验方法

切振共作深松机通过销轴与拖拉机三点悬挂进行连接，使用直流电机代替拖拉机 PTO 驱动振动翼板，通过改变电压调节翼板振动频率。拉力传感器安装在拖拉机上拉杆与深松机连接处，用于测量切振共作深松机作业过程中的耕作阻力，耕作阻力通过中泰联创数据采集卡（EM9118B5-6）传输至笔记本电脑（图 11）。基于深松作业最佳参数并结合实际情况，将拖拉机的前进速度设置为 1.0 m/s，作业深度为 300 mm，振动频率设置为 9、12 和 15 Hz。试验开始前，用标杆分别在选定的作业区域（40 m \times 10 m）的两侧 0、5、35 和 40 m 处进行标记，方便驾驶人员观察。作业前 5 m 用于拖拉机调整行驶速度，中间 30 m 平稳行驶阶段用于各项数据采集，后 5 m 用于减速。



图 11 田间试验

Fig.11 Field experiment

3.2 试验结果分析

3.2.1 耕作阻力及功耗

将试验采集的数据导出，运用 Origin 进行绘图，图 12 为不同振动频率下的耕作阻力。其中，无振动的耕作阻力均值为 2 158.06 N，振动频率 9、12 和 15 Hz 的耕作阻力均值为 1 692.34、1 347.36 和 1 824.99 N,相较于无振动深松，分别降低了 21.58%、37.56 % 和 15.43 %。

深松作业过程的功耗主要为深松功耗和振动功耗两部分组成，首先用拉力传感器测试出深松阻力，然后用深松阻力乘以速度得出深松功耗的大小；振动机构通过电机来驱动，计算电机功耗即可得出振动功耗。将深松功耗和振动功耗进行整合，运用 Origin 进行绘图，图 13 为不同振动频率下的功耗。其中，无振动的功耗均值为 2 158.06 W，振动频率 9、12 和 15 Hz 的功耗均值为 1 777.16、1 460.45 和 1 966.65 W,相较于无振动深松，分别降低

了 17.65%、32.32% 和 8.87%。

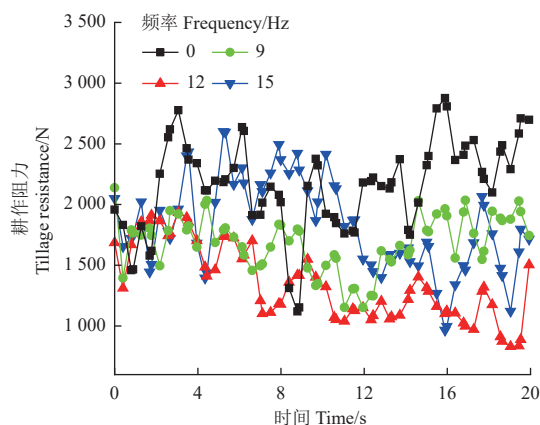


图 12 耕作阻力试验结果

Fig.12 Tillage resistance test results

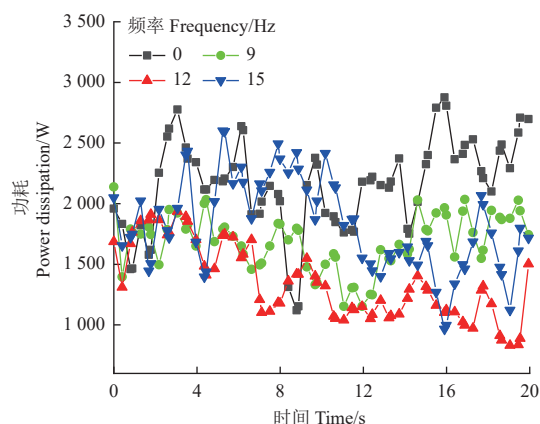


图 13 功耗试验结果

Fig.13 Power consumption test results

3.2.2 土壤坚实度

运用 SC900 土壤坚实度仪分别测量不同频率下深松前后的土壤坚实度, 测量结果如表 8。从表 8 可知, 0~10 cm (耕作层) 的土壤坚实度较深松前平均降低率为 66.44%, 10~20 cm (犁底层) 的土壤坚实度较深松前平均降低率为 77.27%, 20~30 cm (心土层) 的土壤坚实度较深松前平均降低率为 78.63%。各层土壤的土壤坚实度平均降低率都超过了 65%, 其平均降低率为 74.11%。

表 8 土壤坚实度降低率

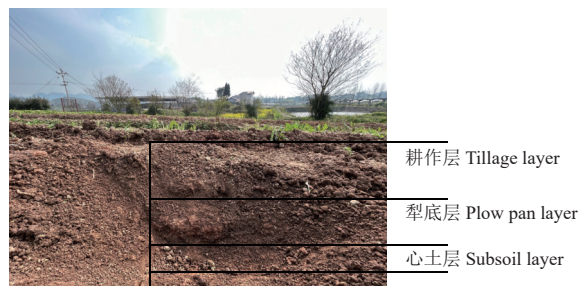
Table 8 Reduction rate of soil hardness

深度 Depth/cm	频率 Frequency/Hz	坚实度 Compaction/kPa	降低率 Reduction rate/%
≥0~10 (耕作层 Cultivated layer)	0	172.369	54.51
	9	112.04	70.45
	12	103.42	72.72
	15	120.89	68.1
≥10~20 (犁底层 Plough pan)	0	482.63	74.73
	9	420.15	78.01
	12	413.68	78.34
	15	420.25	78.01
≥20~30 (心土层 Subsoil layer)	0	586.05	74.15
	9	443.85	80.44
	12	448.16	80.23
	15	460.56	79.71

3.2.3 土壤扰动效果

用工具扒出深松后的土壤 (图 14a), 然后用卷尺

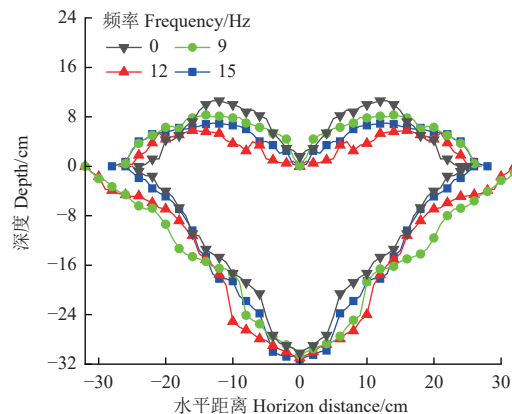
测量土壤轮廓 (图 14b) 所有数据测量完毕后^[29], 将测量数据导入 Origin 软件中, 由 Origin 生成土壤扰动轮廓曲线, 如图 14c 所示。



a. 土壤扰动截面
a. Soil disturbance section



b. 土壤轮廓测量
b. Soil profile measurement



c. 不同振动频率下土壤轮廓曲线
c. Soil profile curves at different vibration frequencies

图 14 土壤扰动轮廓曲线

Fig.14 Soil disturbance profile curve

根据深松机作业标准^[30], 土壤膨松度应不低于 10% 且不高 40%, 土壤扰动系数应不低于 50%。具体计算公式如下:

$$P = (A_h - A_q) / A_q \times 100\% \quad (11)$$

$$y = A_s / A_q \times 100\% \quad (12)$$

式中 P 为土壤膨松度, %; A_q , A_h 为深松前后地表曲线到理论沟壑曲线之间的积分面积, cm^2 ; y 为土壤扰动系数, %; A_s 为深松前地表曲线到实际沟壑之间的积分面积, cm^2 。 A_q 、 A_h 、 A_s 运用 Origin 软件中的积分功能得出, 结果如表 9 所示。由表 9 可知, 土壤膨松度平均值为

19.7%，土壤扰动系数平均值为 60.99%。

表 9 土壤膨松度及土壤扰动系数
Table 9 Soil fluffy degree and disturbance coefficient

频率 Frequency/Hz	A_g/cm^2	A_h/cm^2	A_s/cm^2	$P/\%$	$y/\%$
0	2 009.65	1 305.6	688.9	24.42	52.77
9	1 942.85	1 380	932.5	22.53	67.57
12	1 756.05	1 375	774.5	18.69	56.32
15	1 74.25	1 324.8	891.9	13.15	67.32
平均值 Average value	1 470.7	1 346.35	821.95	19.7	60.99

注： A_g 为深松前地表曲线到理论沟壑曲线之间的积分面积， cm^2 ； A_h 为深松后地表曲线到理论沟壑曲线之间的积分面积， cm^2 ； A_s 为深松前地表曲线到实际沟壑之间的积分面积， cm^2 ； P 为土壤膨松度，%； y 为土壤扰动系数，%。
Note: A_g is the integrated area between the surface curve before subsoiling and the theoretical gully curve, cm^2 ; A_h is the integral area between the surface curve after subsoiling and the theoretical gully curve, cm^2 ; A_s is the integral area between the surface curve before subsoiling and the actual gully, cm^2 ; P is the soil bulk, %; y is the soil disturbance coefficient, %.

3.2.4 深松稳定性

分别测量不同振动频率下的深松深度，在同一频率下选取 5 个测量点取平均值，然后计算每个振动频率的变异系数和稳定性系数，计算式如下：

$$V=s/a\times 100\% \quad (13)$$

$$U=1-V \quad (14)$$

式中 V 为深松深度变异系数，%； s 为深松深度标准差， cm ； a 为深松深度平均值， cm ； U 为深松深度稳定性系数，%。结果见表 10。由表 10 可知，变异系数平均值为 2.13%，稳定性系数平均值为 97.87%。

表 10 深松深度和稳定性
Table 10 Subsoiling depth and stability

频率 Frequency y/Hz	深松深度平均值 Average subsoiling depth/cm	标准差 Standard deviation/cm	变异系数 Variation coefficient/%	稳定性系数 Stability coefficient/%
0	30.5	0.82	2.69	97.31
9	31	0.64	2.06	97.94
12	30.9	0.57	1.84	98.16
15	30.6	0.59	1.93	98.07
平均值 Average value	30.75	0.655	2.13	97.87

4 结 论

1) 基于西南地区紫色土土壤黏重、含水率高的土壤特性，设计了切振共作深松机，本文提出了一种基于强迫振动的切振共作新方式，振动深松方式由传统整体振动模式转变为局部振动模式。

2) 运用三维软件建立切振共作深松机的数学模型，运用离散元软件对深松机作业过程进行仿真分析，基于不同的作业速度，探究切振共作深松机在同一耕深下各层土壤颗粒混合情况、土层扰动效果和耕作阻力，获取最佳作业速度范围 0.9~1.1 m/s，基于不同的振动频率，探究切振共作深松机在同一耕深下的耕作阻力，得到最佳振动频率区间为 9~15 Hz；通过正交试验得出深松作业最佳参数为：作业速度 0.96 m/s、耕作深度 300.24 mm、振动频率 11.43 Hz。结合实际情况，田间试验设置作业速度 1.0 m/s、耕作深度 300 mm、振动频率 12 Hz。

3) 对切振共作深松机进行了田间试验，试验结果表

明，切振共作深松机减阻降耗效果明显，相较于无振动深松，切振共作深松在振动频率为 9、12 和 15 Hz 时耕作阻力分别降低了 21.58%、37.56%、15.43%，功耗分别降低了 17.65%、32.32 %、8.87 %。深松后土壤坚实度平均降低率为 74.11%，土壤膨松度平均值为 19.7%，土壤扰动系数平均值为 60.99%，变异系数平均值为 2.13%，稳定性系数平均值为 97.87%；各项指标均满足深松机作业标准要求。

[参 考 文 献]

- [1] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 78-84.
ZHANG Ruifu, YANG Hengshan, GAO Julin, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 78-84. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7-15.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(22): 7-15. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谭新赞, 沈从举, 代亚猛, 等. 1SZL-300 型振动深松整地联合作业机的研制[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(10): 2566-2573.
TAN Xinzan, SHEN Congju, DAI Yameng, et al. Development of 1SZL-300 type vibratory subsoiling and soil preparation combined machine[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(10): 2566-2573. (in Chinese with English abstract)
- [4] 于晓芳, 孙洪利, 高聚林, 等. 深松对不同耐密性春玉米增密增产调控机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(13): 35-46.
YU Xiaofang, SUN Hongli, GAO Julin, et al. Mechanism behind densification and yield increase of spring maize with different density-tolerance regulated by subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(13): 35-46. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张斌, 沈从举, 李承明, 等. 自激振动深松机关键部件仿真设计及试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(10): 51-57, 63.
ZHANG Bin, SHEN Congju, LI Chengming, et al. Simulation Design and Test of Key Components of Self-excited Vibration Subsoiler [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(10): 51-57, 63. (in Chinese with English abstract)
- [6] 邹亮亮, 刘功, 苑进, 等. 主动润滑减阻曲面深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 34-43.
ZOU Liangliang, LIU Gong, YUAN Jin, et al. Design and test of active lubrication and drag reduction curved subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 34-43. (in Chinese with English abstract)
- [7] SUN J Y, WANG Y M, MA Y H, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in

- Engineering Software, 2018, 119: 30-37.
- [8] WANG Y M, LI N, MA Y H. Field experiments evaluating a biomimetic shark-inspired (BioS) subsoiler for tillage resistance reduction[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 196: 40-52.
 - [9] 张鹏, 郭志军, 金鑫, 等. 仿生变曲率深松铲柄减阻设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(5): 1174-1183.
ZHANG Peng, GUO Zhi-jun, JIN Xin, et al. Design and experiment of bionic subsoiler with variable variable curvature share shaft drag reduction[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(5): 1174-1183. (in Chinese with English abstract)
 - [10] 李霞, 张东兴, 王维新, 等. 受迫振动深松机性能参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 17-24.
LI Xia, ZHANG Dongxing, WANG Weixin, et al. Performance parameter optimization and experiment of forced-vibration subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(21): 17-24. (in Chinese with English abstract)
 - [11] 赵建国, 王安, 马跃进, 等. 深松旋耕碎土联合整地机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 46-54.
ZHAO Jianguo, WANG An, MA Yuejin, et al. Design and test of soil preparation machine combined subsoiling, rotary tillage and soil breaking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(8): 46-54. (in Chinese with English abstract)
 - [12] SHAHGOLI G, FIELKE J, SAUNDERS C. Simulation of the dynamic behavior of a tractor-oscillating subsoiler system[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(02): 147-155.
 - [13] GUILLE S J, SANTOS G, CAMPOS M, et al. Evaluation parameters affecting the performance of vibrating vertical tillage equipment-first stage[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America, 2020, 51(1): 7-13.
 - [14] 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]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 96-102.
CUI Tao, SHI Zhidong, YANG Li, et al. Design and experiment of vibration subsoiler with adjustable spring pre-tightening force[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(S1): 96-102. (in Chinese with English abstract)
 - [15] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 71-78. (in Chinese with English abstract)
 - [16] 袁军, 于建群. 基于 DEM-MBD 耦合算法的自激振动深松机仿真分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 17-24.
YUAN Jun, YU Jianqun. Analysis on operational process of self-excited vibrating subsoiler based on DEM-MBD coupling algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 17-24. (in Chinese with English abstract)
 - [17] XIN L L, LIANG J H. ADAMS-based vibrating subsoiler system simulation analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 128: 42-45.
 - [18] 肖茂华, 钮约, 汪开鑫, 等. 自激振动旋耕刀设计与减扭降耗性能分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 52-63.
XIAO Maohua, NIU Yue, WANG Kaixin, et al. Design of self-excited vibrating rotary tiller and analysis of its performance in reducing torsion and consumption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 52-63. (in Chinese with English abstract)
 - [19] 李吉成, 孙坤鹏, 张永华, 等. 基于离散元法的双翼深松铲耕作行为的仿真分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2023, 44(02): 67-75.
LI Jicheng, SUN Kunpeng, ZHANG Yonghua, et al. Simulation of Tillage Behavior of Double Winged Subsoiler Based on Discrete Element Method[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2023, 44(02): 67-75. (in Chinese with English abstract)
 - [20] 宋朋, 吕金庆. 基于 EDEM-RecurDyn 的自激式振动深松铲耦合仿真研究[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(2): 87-94.
SONG Peng, LU Jinqing. Effects of coupling simulation of self-excited vibratory subsoiler based on EDEM-RecurDyn[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(2): 87-94. (in Chinese with English abstract)
 - [21] 张智泓, 赵亮亮, 赖庆辉, 等. 基于 DEM-MBD 耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 10-20, 38(15)
ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM-MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(15): 10-20. (in Chinese with English abstract)
 - [22] 方会敏, 姬长英, Farman Ali Chandio, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22-28.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22-28. (in Chinese with English abstract)
 - [23] 岳斌, 王学振, 白璐, 等. 分层深松铲前后铲距对土壤扰动行为影响的仿真与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(11): 162-167, 172.
YUE Bin, WANG Xuezheng, BAI Lu, et al. Simulation and Experiment on the Influence of Longitudinal Tine Spacing of Layered Subsoiler on Soil Disturbance Behaviors[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(11): 162-167, 172. (in Chinese with English abstract)
 - [24] 杭程光. 基于离散元方法的深松土壤扰动行为研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
HANG Chengguang. Soil Disturbance Behavior of Subsoiling Based on Discrete Element Method[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017: 19-29. (in Chinese with English abstract)
 - [25] 都焱. 土力学与基础工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
 - [26] 石志鸣. 丘陵山地振动深松作业质量仿真分析与试验[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
SHI Zhiming. Simulation Analysis and Experiment on the Quality of Vibratory Subsoiling in Hilly and Mountainous Regions[D]. Chongqing: Southwest University, 2021: 13-24. (in Chinese with English abstract)
 - [27] 刘坤宇, 苏宏杰, 李飞宇, 等. 基于响应曲面法的土壤离散元模型的参数标定研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(9): 143-149.

- LIU Kunyu, SU Hongjie, LI Feiyu, et al. Research on parameter calibration of soil discrete element model based on response surface method[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(9): 143-149. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李玲玲, 李广宇, 张煜晗, 等. 弧形深松铲工作过程和松土效果的离散元法仿真分析[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(13): 201-204.
- LI Lingling, LI Guangyu, ZHANG Yuhua et al. Simulation analysis of working process and effect of circular arc subsoiling shovel by discrete element method[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(13): 201-204. (in Chinese with English abstract)
- [29] 向旺, 孙玉华, 刘凡一, 等. 青菜头缩短茎滑切刀研制[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 266-275.
- XIANG Wang, SUN Yuhua, LIU Fanyi, et al. Development of the sliding cutter for the shortened stem of tumorous stem mustard[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(16): 266-275. (in Chinese with English abstract)
- [30] 中国机械工业联合会, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 保护性耕作机械深松机: GB/T 24675.2-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.

Simulation analysis and test of the operation performance of shear vibration co-operation subsoiler based on discrete element method

LI Mingsheng^{1,2,3}, WANG Yuanjun^{1,2}, XIE Shouyong^{1,2,3*}, LIU Fanyi^{1,2,3},
CHEN Xingzheng^{1,2,3}, LI Xiang^{1,2}, LIU Wei^{1,2}

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Southwest Agricultural Equipment Innovation Center, Chongqing 400715, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Hilly and Mountainous Areas, Chongqing 400715, China)

Abstract: Deep-pine operation is often required for the high-power tractor for traction at present, leading to low operating efficiency. More importantly, the total power consumption of vibratory deep-pine operation is ever-increasing with the increase of vibration frequency. Therefore, there is an urgent need to carry out research on the high-efficiency vibratory deep-pine machine for high operational efficiency and low energy loss. In this study, a deep loosening machine was designed to cooperate with the cutting and local vibration. The loosening mode was adopted for the cutting first and vibration second, i.e. the front deep loosening shovel was fixed to break the soil. The angle of entry was always in the position of the lowest soil resistance. The rear shovel was vibrated around the shaft to loosen the soil. The soil resistance was reduced to increase the range of loosening for less crushing of soil, in order to effectively reduce the consumption of vibration energy. The discrete element method (DEM) was used to analyze the effect of cut-and-vibrate deep loosening on soil disturbance. Hertz Mindlin with Bonding model in EDEM was used to establish the contact model among soil particles. The cut-and-vibrate and traditional deep loosening were simulated to compare at the same time. The experimental model of the deep-pine shovel was established using SolidWorks2022 software and then saved in a format suitable for EDEM. The model was also imported into EDEM for constraining, driving, and simulation. The motion state of the simulation model was divided into two strokes of breaking and vibratory deep loosening, according to the actual vibratory during deep loosening. The cut-and-vibrate co-operative mode effectively reduced the tillage resistance of the deep-pine machine; The one-factor test showed that the optimal intervals operating speed and vibration frequency were 0.9-1.1 m/s, and 9-15 Hz, respectively; The orthogonal test demonstrated that the optimal parameters were obtained for the deep-pine operation: operating speed 0.96 m/s, tillage depth 300.24 mm, and vibration frequency 11.43 Hz. The actual performance of drag reduction was tested on the cut-and-vibrate deep-threader. The simulation was also combined with the best operating parameters of deep-threading. The field tests were conducted, where the forward speed of the tractor was set at 1.0 m/s, the operating depth was 300 mm, and the vibration frequency was set at 9, 12, and 15 Hz. The field test showed that the cut-and-vibrate deep pine machine shared the outstanding drag reduction under the same speed and plowing depth, compared with the non-vibrating deep pine machine. The plowing resistance was reduced by 15.43%-37.56%; The power consumption was reduced by 8.87%-32.32%. The drag reduction was the most significant when the vibration frequency was 12 Hz. The plowing resistance was reduced by 37.56%, the power consumption was reduced by 32.32%, the solidity of the soil was reduced by 74.11%, and the soil disturbance coefficient was 56.32%, and the deep pine depth of 309 mm, deep pine was reduced by 15 Hz. The stability coefficient for the deep pine depth of 309 mm was 98.16%. The deep pine depth and its stability were in line with the industry standard. The cutting and vibration co-production deep pine machine shared outstanding performance to reduce the resistance and consumption. The finding can provide a new reference to optimize the vibration deep pine machine.

Keywords: agricultural machinery; simulation; hilly and mountainous areas; subsoiler; EDEM