doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.011

保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验

赵淑红　王加一　陈君执　杨悦乾　谭贺文
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对东北地区深松整地作业中,深松铲土壤扰动量和耕作阻力大的问题,以离散元(EDEM)软件仿真分析铲尖对土壤的作用为依据,设计了拟合曲线型深松铲。采用离散元软件模拟深松铲铲尖在土壤中的运动,获得铲尖上方土壤颗粒运动轨迹的拟合曲线和拟合方程,采用线元设计法对线形优化,获得铲柄外形曲线;同时设计了刃部、切削刃角、入土角,并通过铲柄与铲尖的互作效应试验验证了分层的可行性与合理性。土槽对比试验表明,拟合曲线型深松铲有效降低了土壤扰动量和耕作阻力,比折线式深松铲土壤扰动量减少了 53.6%,耕作阻力减少了 36.23%;比圆弧式深松铲土壤扰动量减少了 66.18%,耕作阻力减少了 29.18%。田间对比试验表明,拟合曲线型深松铲比折线式深松铲回土面积增加了 81.03%,比圆弧式深松铲的回土面积增加了 146.95%。土槽和田间试验表明,拟合曲线型深松铲土壤扰动量小、耕作阻力小,满足深松作业的要求。

关键词: 深松铲; 拟合曲线; 土壤扰动; 耕作阻力; 离散元
中图分类号: S222.23　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)02-0082-11

Design and Experiment of Fitting Curve Subsoiler of Conservation Tillage

ZHAO Shuhong　WANG Jiayi　CHEN Junzhi　YANG Yueqian　TAN Hewen
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: A fitting curve subsoiler was designed aiming at the problems of large soil disturbance and large tillage resistance caused by subsoiler in sub-soiling site preparation work in Northeast China. The discrete element (EDEM) software was used to simulate the movement of the tip of a subsoiler in the soil. Through calculating, the fitting curve and fitting equation were obtained from the trajectory of soil particles above the tip of shovel. After summarizing, the method of line element design was used to optimize the alignment to acquire the curve of shovel handle shape, meanwhile, to design the edge, lip and penetration angle were cut. Then the interaction effect test of shovel handle and shovel tip were used to prove the feasibility and rationality of the design. The contrast test of soil trough showed a fitting curve subsoiler can effectively reduce the soil disturbance and tillage resistance. Compared with polygonal subsoiler, the fitting curve subsoiler made the soil disturbance reduced by 53.6%, tillage resistance reduced by 36.23%. Compared with circular subsoiler, it made the soil disturbance reduced by 66.18% and the tillage resistance reduced by 29.18%. Compared the fitting curve subsoiler with the polygonal subsoiler with field experiment, it was showed that using the fitting curve subsoiler made the soil return area increased by 81.03%. Compared with circular subsoiler, the fitting curve subsoiler made the soil return area increased by 146.95%. Both the soil trough experiment and the field experiment verified that the fitting curve subsoiler can make the soil disturbance smaller and tillage resistance smaller, which met the requirements of sub-soiling operation.

Key words: subsoiler; fitting curve; soil disturbance; tillage resistance; discrete element

收稿日期: 2017-07-11　修回日期: 2017-09-03
基金项目: "十二五"国家科技支撑计划项目(2014BAD11B01)、黑龙江省博士后科研启动基金项目(LBH-Q16026)和黑龙江省重大科技招标项目(GA14B101-01)
作者简介: 赵淑红(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事田间农业机械及力学特性研究,E-mail: shhzh091@sina.com
通信作者: 杨悦乾(1967—),男,研究员,主要从事保护性农业装备研究,E-mail: yangyueqian@126.com

0　引言

为了打破坚硬的土壤犁底层，同时降低耕作阻力和表层土壤扰动量，选择在免耕播种地区进行深松。目前深松铲类型多为折线式、圆弧式，折线式深松铲更多用于深松灭茬机上，耕作阻力较大，对拖拉机的动力要求较高，不适合机械大范围作业；圆弧式深松铲多用于深松机上，其土壤表层扰动量较大，土壤水肥损失严重，不能满足保护性耕作的要求[1-2]。

近些年来，学者对深松铲的研究取得了大量成果[3-9]，其主要从振动和仿生原理两方面对深松铲进行设计与研究。

随着软件的发展，仿真分析以减少样机的加工及试验时间的优点，逐渐成为模拟试验的一种方法。离散元法可用来模拟颗粒材料和研究材料间的微观及宏观变化。近几年学者通过离散元软件仿真模拟触土部件工作状态，并与试验进行对比，验证了离散元软件模拟土壤与试验误差较小[10-11]，因此离散元软件可用于模拟触土部件与土壤模型。在触土部件与土壤研究中，触土部件作用于土壤后，土壤往往在运动行为上反作用于触土部件。对于深松铲的研究，铲柄使土壤沿铲柄侧向远离铲柄，土壤在运动行为上对于铲柄的影响较小，而铲尖作用于土壤后，土壤在运动行为上沿铲柄运动方向较明显，对铲柄的影响较大，且土壤轨迹沿铲柄运动可以增加滑移，减少摩擦[12-15]。因此本文依据铲尖对土壤的作用设计铲柄，建立铲尖与土壤的仿真模型，获得铲尖上方土壤颗粒运动轨迹的拟合曲线，设计拟合曲线型弧状深松铲，运用离散元法对铲柄、铲尖的互作效应进行仿真试验，确定设计的合理性，并进行土槽对比试验与田间对比试验，验证设计的优良性。

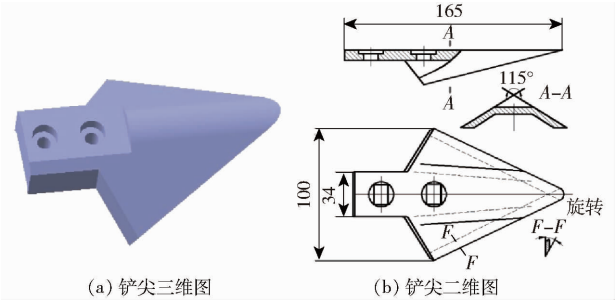
1　离散元仿真分析

深松铲的主要作用原理是深松铲铲尖在前端的深入开土以及后端深松铲铲柄的破土。为设计铲柄形状，选取铲尖对土壤的影响进行分析。考虑到实际中铲尖不可能单独运动，设置连接段为任何位置，都会对试验结果造成影响，因此选取离散元仿真软件对其分析。

1.1　仿真模型与铲尖模型的建立

本试验选取常用的箭形深松铲铲尖进行试验，为保证铲尖作业范围，设置长 1 000 mm、宽 400 mm、高 500 mm 的土壤仿真模型。

依据文献[16]规定的深松铲铲尖基本尺寸，建立铲尖模型，如图 1。保存为 igs 格式导入 EDEM 软件中。材料为 Q235 钢，密度为 7 850 kg/m^3，剪切模量为 7.7 × 10^{10} Pa，泊松比为 0.3。



(a) 铲尖三维图　　(b) 铲尖二维图

图 1　深松铲铲尖结构图

Fig. 1　Structure diagrams of subsoiler tip

1.2　土壤模型的建立

1.2.1　土壤接触模型

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[17]。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，进而决定了试验时颗粒所运动的轨迹，对不同的仿真对象，须建立不同的接触类型，用以提高仿真结果的准确性。由文献[18]得，在离散元单元法中，颗粒 i 在被作用的过程中主要受力有自身重力 m_ig、颗粒间法向碰撞接触力 F_n、法向阻尼 F_n^d、切向碰撞力 F_t、切向阻尼 F_t^d。颗粒还受到切向力造成的力矩 T_t 和滚动摩擦力矩 T_r。

根据牛顿第二定律，每个颗粒的运动方程为

$$m_i\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t}=m_ig+\sum_{i=1}^{n_i}(F_n+F_n^d+F_t+F_t^d+F) \quad (1)$$

$$I_i\frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t}=\sum_{i=1}^{n_i}(T_t+T_r) \quad (2)$$

式中　v_i——颗粒 i 的移动速度

I_i——颗粒 i 的转动惯量

n_i——颗粒个数

ω_i——颗粒 i 的角速度

F——颗粒 i 的粘聚力

试验地区为东北壤土，具有粒度均匀、透气性好、透水性好、强烈胀缩和扰动特性的特点，土壤有一定粘附力和弹塑性[19]。因此土壤颗粒与深松铲铲尖之间设定为 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型，土壤颗粒与土壤颗粒之间除设置 Hertz - Mindlin(no slip)接触模型外，考虑到壤土之间内聚特性较强，土壤间相互粘结，因此添加 Hertz - Mindlin with bonding 接触模型。依据文献[19]对于试验区相同类型土壤颗粒微观参数的测定和文献[20]适应大多数土壤模型所用的微观参数，如表 1 所示。

1.2.2　土壤颗粒模型

为研究每一土壤颗粒的运动轨迹，设置土壤颗粒模型为单一颗粒。并修正实际中的土壤颗粒粒径，设置土壤颗粒半径为 4 mm。

表 1 离散元法仿真的微观参数

Tab. 1 Microscopic parameters of DEM simulation

参数	数值
土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	2 150
土壤泊松比	0.41
土壤剪切模量/Pa	1.24×10^{6}
土壤颗粒间静摩擦因数	0.3
土壤颗粒间动摩擦因数	0.2
土壤与深松铲铲尖之间恢复系数	0.6
土壤与土壤之间恢复系数	0.6
颗粒间法向接触刚度系数/(N·m^{-1})	3.4×10^{8}
颗粒间切向接触刚度系数/(N·m^{-1})	1.5×10^{8}
颗粒间临界法向应力/kPa	200
颗粒间临界切向应力/kPa	68

1.3 仿真分析

1.3.1 仿真几何模型的设置

在所设定的仿真模型中生成土壤颗粒,固定时间步长为 8.2×10^{-5} s,Rayleigth 时间步长为 5.47×10^{-4} s。总土壤颗粒生成时间为 8 s,土壤颗粒自然沉降 1 s,铲尖入土深度为 300 mm,运动时间为 1 s,运动速度选取与深松铲正常作业相近的 0.5 m/s,沿 X 轴正向,如图 2 所示。

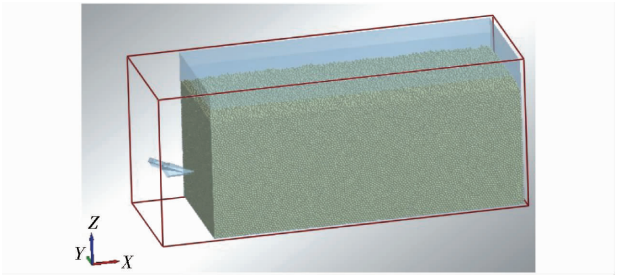


图 2 仿真几何模型

Fig. 2 Simulation geometry model

1.3.2 结果与分析

仿真完成后,观察铲尖作业后土壤的运动效果。由于铲尖作用正上方土壤颗粒在 y 轴方向上位移不明显,并参考文献[13],截取铲尖作用的铅垂面为剖视图,选择铲尖作业正上方的土壤颗粒,如图 3,并分析其运动轨迹,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,每个土壤颗粒在 $X-Z$ 平面内运动位移较大,且运动轨迹可分为 3 个过程,首先土壤颗粒被铲尖扰动上升,其次在铲尖通过后对前方的土粒再次扰动升起的过程中使其后旋,最后在铲尖完全通过此区域后回落。根据颗粒在不同深度的运动规律的不同,可将其沿 Z 轴负向平均分为 5 个区域(即深度方向),深度分别为 60 mm,分析其运动轨迹,局部图如图 5 所示。

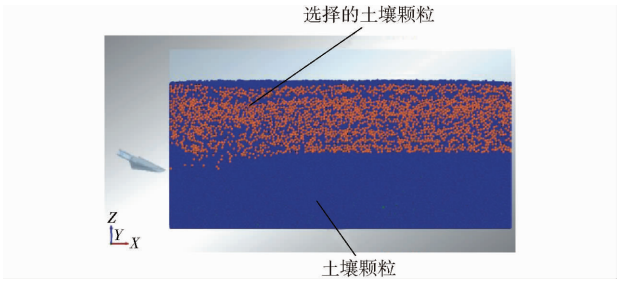


图 3 土壤颗粒的选择

Fig. 3 Selection of soil particle

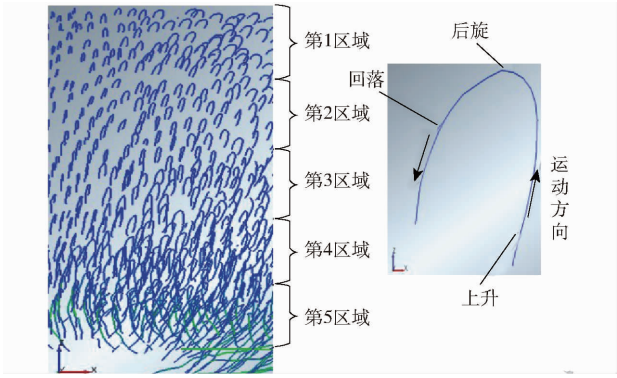


图 4 土壤颗粒轨迹图

Fig. 4 Trajectory map of soil particle

为设计铲柄,选取回落轨迹段进行分析。对每一区域土壤颗粒运动轨迹进行分析。观察土壤颗粒坐标变化,其在 Z 轴方向最小位移为 6 mm,最大位移为 25 mm,且土壤颗粒直径为 8 mm。为选取时在 Z 轴方向土壤轨迹不遗漏,在每一区域内按深度方向每间隔 6 mm 选取一粒土壤颗粒(选取 5 粒),输出每一颗粒的数据结果分别为每一时刻对应的 X、Z 坐标,时间步长为 0.01 s,其 Z 坐标值显著变小时为土壤颗粒的回落轨迹段,得到在同一区域内,5 颗土壤颗粒的回落轨迹段对于同一线形拟合方程的拟合度都较高。因此选择单一颗粒运动轨迹代表单一区域土壤颗粒运动轨迹,轨迹图如图 6 所示。选取其中单一颗粒,回落轨迹段内的坐标值在 Matlab 中做颗粒轨迹拟合曲线,结果如图 7 所示,并得到第 1 区

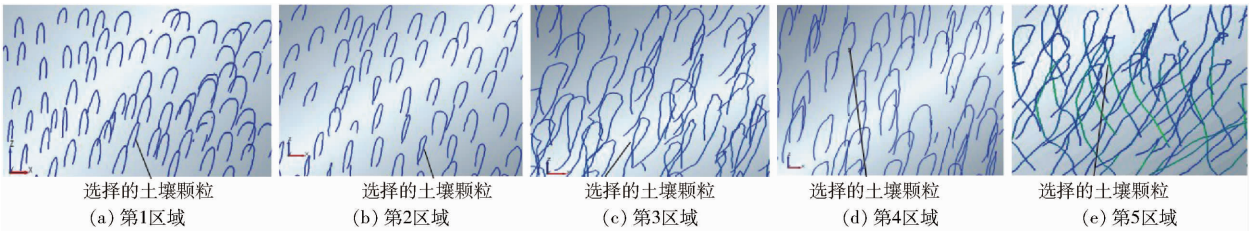
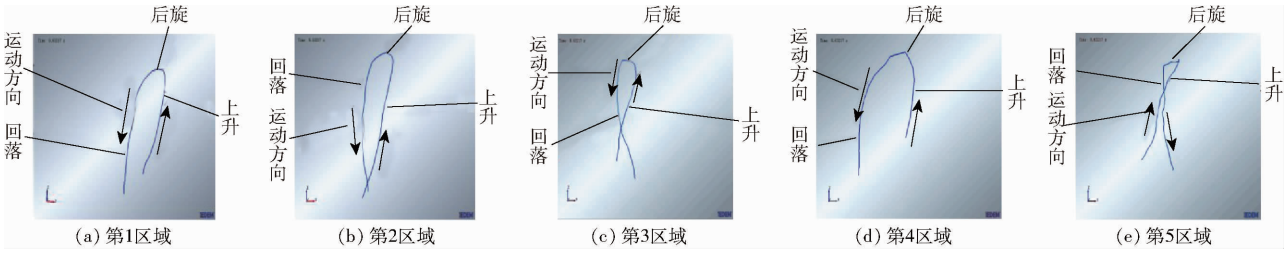


图 5 区域土壤颗粒的运动轨迹图

Fig. 5 Soil particle trajectory maps of various areas



(a) 第1区域　(b) 第2区域　(c) 第3区域　(d) 第4区域　(e) 第5区域

图 6　区域单一土壤颗粒的轨迹图

Fig. 6　Single soil particle trajectory maps of various areas

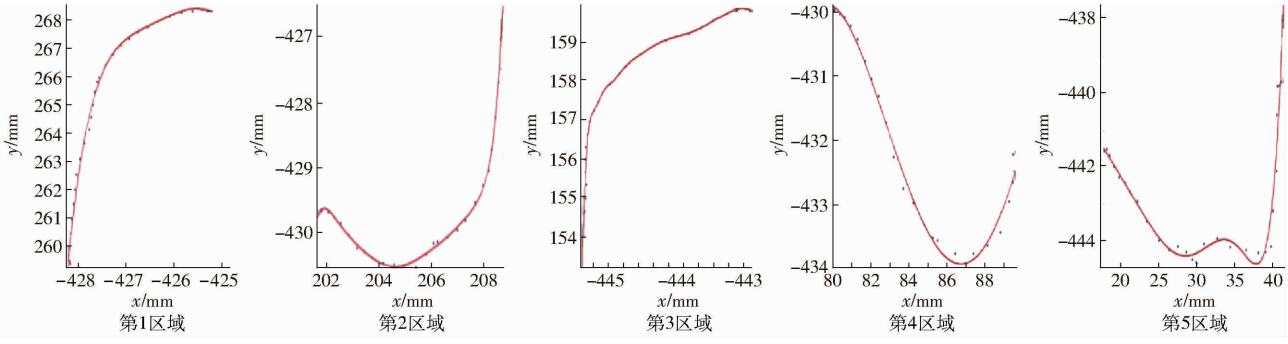


图 7　土壤颗粒的轨迹拟合曲线

Fig. 7　Trajectory fitting curves of soil particles

域土壤轨迹拟合曲线回归方程为

$$y = 159.4e^{-\left(\frac{x+442.8}{4.737}\right)^2} + 5.297e^{-\left(\frac{x+445.1}{0.1316}\right)^2} + 4.099e^{-\left(\frac{x+455}{0.212}\right)^2} + 4.208e^{-\left(\frac{x+444.9}{0.3917}\right)^2} + 18.84e^{-\left(\frac{x+444.9}{1.041}\right)^2} \quad (3)$$

第 2 区域土壤轨迹拟合曲线回归方程为

$$y = 0.1122x^5 + 238.9x^4 + 2.034\times10^5x^3 + 8.658\times10^{10}x^2 + 1.843\times10^{10}x + 1.569\times10^{12} \quad (4)$$

第 3 区域土壤轨迹拟合曲线回归方程为

$$y = 1.382\times10^{-7}x^9 - 3.012\times10^{-5}x^8 + 0.002\,905x^7 - 0.162\,8x^6 + 5.843x^5 - 139.2x^4 + 2\,202x^3 - 2.229\times10^4x^2 + 1.311\times10^5x - 3.415\,2\times10^5 \quad (5)$$

第 4 区域土壤轨迹拟合曲线回归方程为

$$y = -9.68\times10^{-5}x^4 + 9.908\times10^{-4}x^3 + 0.444\,1x^2 - 0.111\,3x - 433.9 \quad (6)$$

第 5 区域土壤轨迹拟合曲线回归方程为

$$y = 1.702\times10^{-7}x^7 + 1.718\times10^{-5}x^6 + 7.024\times10^{-5}x^5 + 0.014\,74x^4 + 0.165\,3x^3 + 0.944x^2 + 2.342x - 402.6 \quad (7)$$

各个回归系数分别为 0.975、0.997、0.997、0.990、0.925。每一区域数学函数曲线的拟合度都较高，可靠性较强，因此可以基于此线形设计深松铲铲柄的外轮廓曲线。

2　深松铲设计

传统深松铲一般包括铲柄与机架连接段、铲柄和铲尖，如图 8 所示。铲柄与机架连接段主要与机架连接，要求连接稳定性较强，并且可以调节深松铲入土深浅；主要作业部分为铲柄和铲尖。

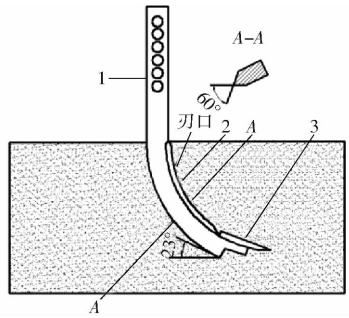


图 8　传统深松铲示意图

Fig. 8　Diagram of traditional subsoiler

1. 铲柄与机架连接段　2. 铲柄　3. 铲尖

2.1　铲柄

为与大部分深松机灭茬机械、深松机、中耕施肥机械相配合，要求铲柄与机架连接段的设计与标准深松铲尺寸相符合[21]。

2.1.1　铲柄线形的理论设计

为降低深松铲与土壤的碰撞，减小其扰动面积，同时降低耕作阻力。根据铲尖作业后土壤颗粒的运动轨迹，由表 2 建立数学模型平面图。经测量，东北垄作玉米播种深度为(50 ± 10) mm，常年耕作形成的耕作层厚度为 120 mm 左右，犁底层厚度约为 120 mm，心土层厚度为 240 mm 左右，在 AutoCAD 中建立各段曲线与土壤层对应关系，如图 9 所示。

2.1.2　铲柄线形的优化

由图 9 可看出，铲尖作用后土壤颗粒回落轨迹 1、2 段曲线与水平方向夹角为锐角，可以利用滑移

表 2 优化后土壤轨迹曲线方程

Tab. 2 Optimized soil trajectory curvilinear equation

序号	土壤轨迹曲线方程	回归系数 R^2
1	$y=-0.3845x^4-700.4x^3-4.785\times10^{10}x^2-1.453\times10^8x-1.654\times10^{10}$	0.999
2	$y=8.951\times10^{-5}x^5-0.02656x^4+3.148x^3-186.2x^2+5496x-6.52\times10^4$	0.999
3	$y=1.702\times10^{-7}x^7+1.718\times10^{-5}x^6+7.024\times10^{-5}x^5+0.01474x^4+0.1653x^3+0.944x^2+2.342x-402.6$	0.925

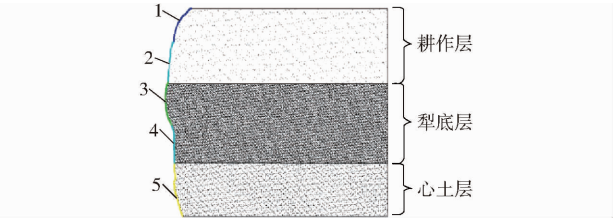


图 9 数学函数曲线图

Fig. 9 Graph of mathematical function

原理降低碰撞量和耕作阻力[22-24]。故将 1、2 段曲线的整体点坐标导入 Matlab 中拟合为第 1 段,作业时对应耕作层土壤;3、4 段曲线呈现与水平方向的夹角由锐角向钝角过渡,因此将 3、4 段曲线的点坐标导入 Matlab 中拟合为第 2 段,作业时对应犁底层土壤;并将 5 段曲线的点坐标导入 Matlab 中拟合为第 3 段,5 段曲线与水平方向夹角为钝角,可以增加对上方土壤的翻垡[1],故对应部分在犁底层之下,为心土层土壤,对犁底层的打破起到主要作用。本次拟合各段曲线在各方向上有平移,但曲线线形不变,各段线形拟合曲线如图 10,拟合方程如表 2 所示。

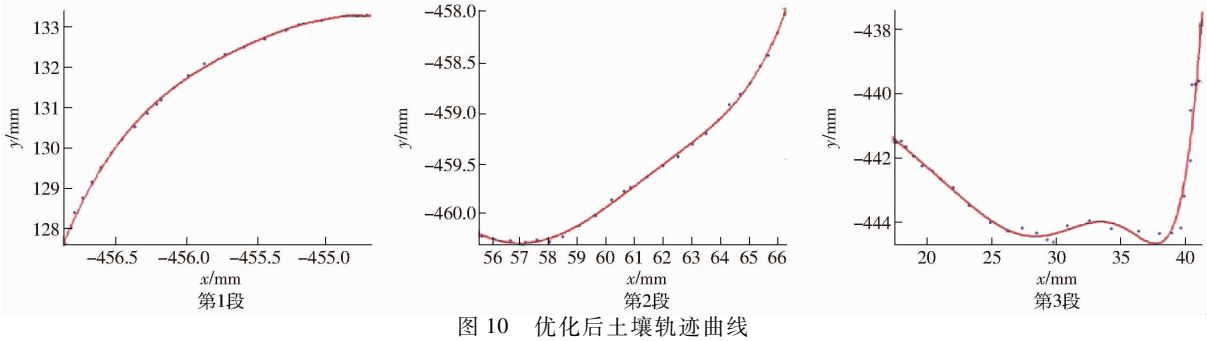


图 10 优化后土壤轨迹曲线

Fig. 10 Optimized soil trajectory fitting curves

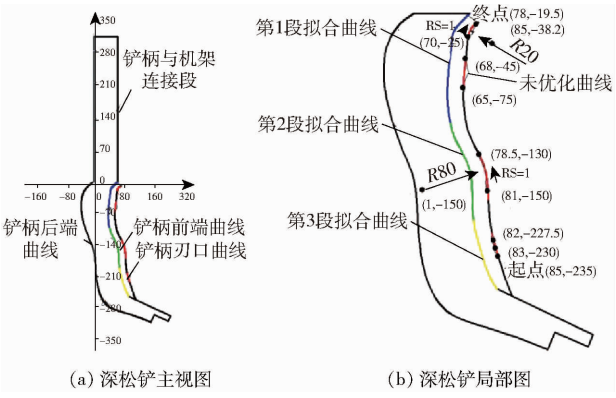
保证各段拟合曲线线形不变的前提条件下在 AutoCAD 中构建深松铲基本模型,按各层土壤厚度比相应扩大 3 段曲线。依据文献[25-26],采用线元设计法,将线形与连接不合理处优化为由多段圆弧和缓和曲线段(或直线段)顺序组合而成,从而减少连接处的应力集中问题,使铲柄受力更均匀。

在铲柄后端曲线的设计上,为适应土壤回落轨迹,增加回土量,降低土壤扰动,同时保证深松铲作业时受力更均匀,避免应力集中现象,铲柄后端曲线设计为优化后的 3 段拟合曲线,结果如图 11。

2.1.3 刃口的设计

现深松铲刃部多为楔形刃或无刃口,楔形刃锥角设计较小时能够有效降低牵引阻力,但稳定性较差,容易折刃[27],不开刃深松铲虽然稳定性较强,但其牵引阻力较大[28]。部分增加刃口的深松铲刃口角度一般取 60°,为楔形刃口,由文献[2]及观察深松铲作业时的实际状况,东北地区深松作业时,会使铲柄前段堆积为土核,如图 12 所示。

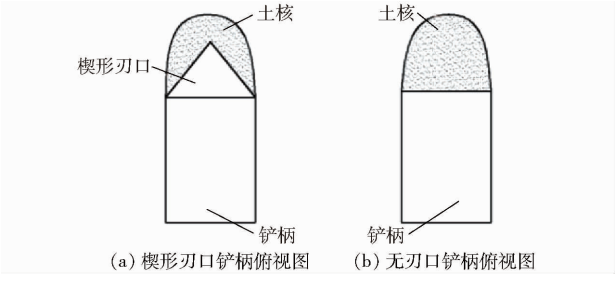
现有的楔形刃深松铲和不开刃深松铲,在作业过程中刃口端堆聚的土核较多,增大了作业阻力,从而使作业性能受到影响。而国内文献中,针对此讨



(a) 深松铲主视图 (b) 深松铲局部图

图 11 拟合曲线型深松铲示意图

Fig. 11 Diagrams of fitting curve subsoiler



(a) 楔形刃口铲柄俯视图 (b) 无刃口铲柄俯视图

图 12 土壤堆积示意图

Fig. 12 Diagrams of soil accumulation

论的文献较少，单纯对深松铲模型进行受力分析，与实际工况下深松铲的形态有一定的差异性。且土核的堆聚多为外凸曲线状。因此依据文献[2]，在刃口的线形设计上采取介于楔形刃和无刃口之间的外凸形轮廓曲线，降低耕作阻力的同时保证刃口的稳定性，且在作业中堆积的土核与轮廓曲线形状基本相似，可以减少土壤粘附，土核的堆聚可以忽略不计。得到深松铲刃口结构及受力如图 13、14 所示。

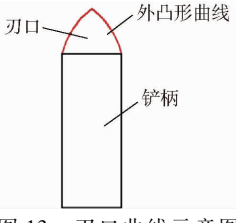


图 13　刃口曲线示意图

Fig. 13　Diagram of blade curve

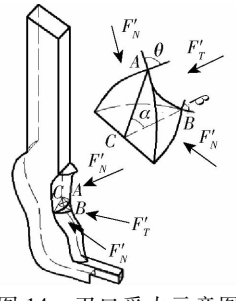


图 14　刃口受力示意图

Fig. 14　Force diagram of edge

根据文献[29]，刃口受到的阻力为

$$F_f = 2F'_N \sin\frac{\beta}{2} + 2\mu F'_N \cos\frac{\beta}{2} + F'_T \tag{8}$$

对式(8)进行推导得到

$$F_f = 2\sqrt{2}F'_N \sin\left(\frac{\beta}{2} + \frac{\pi}{4}\right) + F'_T \tag{9}$$

其中，将 ABC 视为直角三角形，A 处为直角，则

$$\tan\frac{\beta}{2} = \tan\frac{\theta}{2}\cos\alpha \tag{10}$$

式中　β——刃口切削刃角在水平方向的投影，(°)

F'_N——土壤对深松铲的法向作用力，N

F'_T——土壤对深松铲刃的作用力，N

μ——深松铲与土壤间的动摩擦因数

θ——刃口切削刃角，(°)

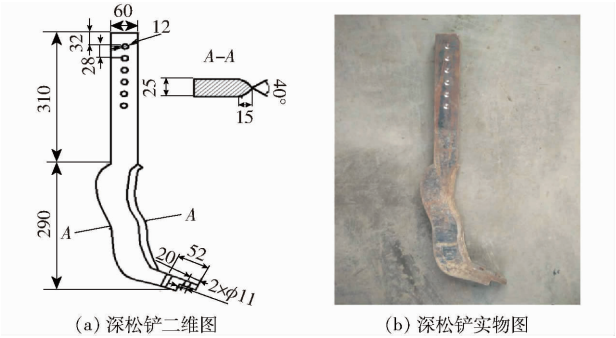
α——刃口切削刃角平面与其在水平面间的夹角，(°)

在深松铲作业速度一定时，F'_N、F'_T视为理想常数值，μ 视为定值，则刃口所受到的阻力与刃口切削刃角在水平方向的投影有关，β 越小，受到的切削阻力越小。β 又与 α、θ 有关，α 越大，θ 越小，β 越小。深松铲柄切削刃角一般取值为 30°～60°，其中壤土的最小切削刃角范围为 40°～45°[30]，外凸形曲线刃口稳定性较强，为减小阻力，取刃口切削角为 40°。

2.2　深松铲作业深度、入土角、刃口高度的确定

犁底层是多年耕作形成的，打破犁底层可以使深松作业不用每年都进行，因此打破犁底层是设计深松铲作业深度时首先要考虑的因素，且犁底层的深度为 120～240 mm，本设计中取深松铲作业深度为 300 mm。深松铲的入土角是影响深松阻力的重要因素之一。入土角在 21°[31] 时耕作阻力最小，因此本设计入土角选为 21°。

东北地区的壤土具有强烈胀缩和扰动特性，弹塑性极限较高，所以要对其破坏，刃口高度设置不宜过低，但刃口高度设置过高，稳定性会有所降低，容易折刃[27]，因此取刃口高度为 15 mm，保证切削刃角的同时，外凸形样条曲线连接。材料选为 65Mn 钢制造，刃部应进行热处理，淬火区为整个刃口部位，硬度为 HRC48～56。深松铲如图 15 所示。



(a) 深松铲二维图　　(b) 深松铲实物图

图 15　拟合曲线型深松铲

Fig. 15　Fitting curve subsoiler

2.3　仿真验证试验

为证明设计思路的合理性，同时验证此设计的可行性，选择在 EDEM 软件中对所设计深松铲进行仿真试验，进一步验证铲尖作用时土壤颗粒的运动与所设计铲柄的关系。

2.3.1　模型的建立

选择上述铲尖仿真试验的几何模型和土壤模型，按所设计深松铲尺寸在 CATIA 中建立拟合曲线型深松铲三维图，如图 16 所示，与铲尖通过螺栓连接装配，导入 EDEM 软件中。材料为 65Mn 钢，密度为 7 865 kg/m^3，剪切模量为 7.9×10^{10} Pa，泊松比为 0.3。

2.3.2　仿真几何模型的设置

建立深松铲与土壤的装配模型。固定时间步长为 8.2×10^{-5} s，Rayleigth 时间步长为 5.47×10^{-4} s。深松铲入土深度为 300 mm，运动时间为 1 s，运动速度为 0.5 m/s，沿 X 轴正向，如图 17 所示。

2.3.3　结果与分析

仿真完成后，观察深松铲作业时土壤的运动轨迹。截取铲尖作用的铅垂面为剖视图，选择铲尖作

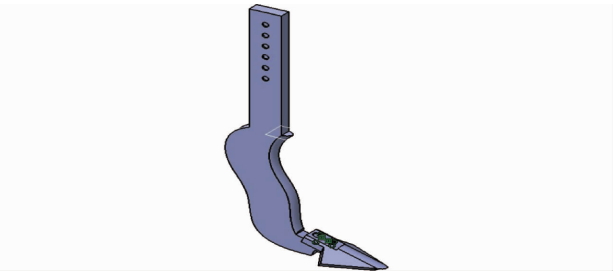


图 16 拟合曲线型深松铲三维图

Fig. 16 Three-dimensional diagram of fitting curve subsoiler

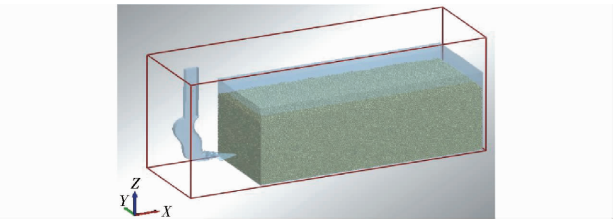


图 17 深松铲仿真几何模型

Fig. 17 Simulation geometry model of subsoiler

业正上方的土壤颗粒,并分析其运动轨迹,如图 18 所示。

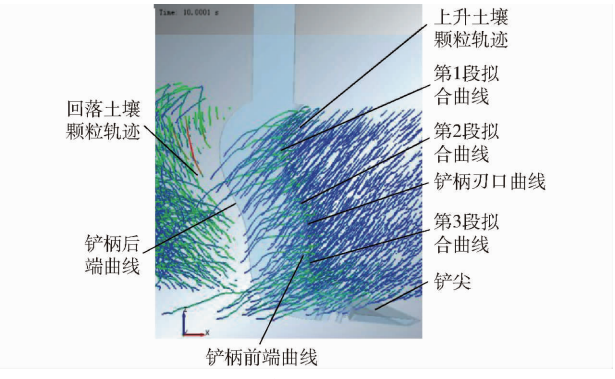


图 18 深松铲作业时土壤颗粒轨迹图

Fig. 18 Trajectory map of soil particle by subsoiler

由仿真结果可得铲尖与铲柄在共同作业时,前方土壤颗粒在铲尖和铲柄前端及刃口第 3 段拟合曲线作用下向上翻垡,与第 1 段拟合曲线产生滑移。在深松铲作业后,土壤整体回落趋势轨迹与铲柄后端曲线基本一致。

因此仿真试验验证了铲柄前端及刃口设计曲线对土壤的作用形式;验证了铲柄后端曲线与土壤整体回落曲线一致;同时验证了本设计的可行性,以及本文总体设计思路的合理性。

3 土槽对比试验

3.1 试验目的

对上述所设计深松铲,取耕作阻力与土壤扰动量为试验指标,并探究深松铲对犁底层深度土壤容重的影响,对拟合曲线型深松铲与折线式、圆弧式深松铲进行对比试验,总结分析其试验效果,观察优劣性。

3.2 试验条件

力的对比试验对试验环境的稳定性要求较高,同时为了在对比试验效果时控制其它无关因素的一致性,因此对比试验采取土槽试验。在黑龙江省农业机械工程科学研究院的室内土槽中进行试验,试验设备如图 19 所示,试验选取土槽长 50 m,宽 3 m,土壤厚度 1 m,其土壤为典型东北壤土,试验区所测土壤深度范围 0 ~ 300 mm。人工浇水改变土壤含水率,并利用干燥法测量土壤含水率和容重,利用硬度仪测量土壤硬度。所有数据测量 3 点,取平均值。土壤参数如表 3 所示。

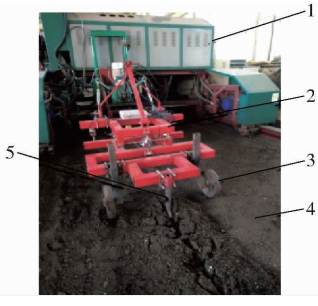


图 19 土槽试验

Fig. 19 Soil bin test

1. 土槽车 2. 测力架 3. 限深轮 4. 土槽 5. 深松铲

表 3 土壤参数

Tab. 3 Soil parameters

参数	深度/mm	数值		
含水率/%	0 ~ 300	14 ± 1	20 ± 1	26 ± 1
土壤容重/(g·cm^{-3})	0 ~ 300	1.42	1.38	1.30
硬度/kPa	0 ~ 125	515	421	366
	125 ~ 250	2 001	1 567	1 123
	250 ~ 300	1 018	725	676

试验所用器材有全液压四轮驱动车(土槽车)、黑龙江省农业机械工程科学研究院智能化研究所研制的六分力三向侧力装置。侧力装置分为上悬挂架和下悬挂架,两个架子间以 6 个拉力传感器(3 个测量垂直力、2 个测量水平力、1 个测量侧向力)铰接相连。拟合曲线型深松铲与折线式、圆弧式深松铲分别与悬挂架通过顶丝固定。

3.3 试验方案

分别取拟合曲线型深松铲与折线式深松铲、圆弧式深松铲单独在土槽车工作速度为 1、2、3 km/h 的牵引带动下对土槽进行深松作业,深松铲入土深度都为 300 mm。通过拉力传感器分别测出每种深松铲作业时的耕作阻力,利用沟形轮廓仪[32]对 3 种深松铲的沟形进行测量,并描绘在坐标纸上,示意图如图 20,B 为扰动宽度,D 为堆顶宽度,d 为开沟宽度,H 为开沟深度,h 为回土深度。同时随机取犁底层深度土壤样本,计算其土壤容重,为防止取样偶然

性误差，每种铲型重复 3 次试验，计算其平均值，比较结果。

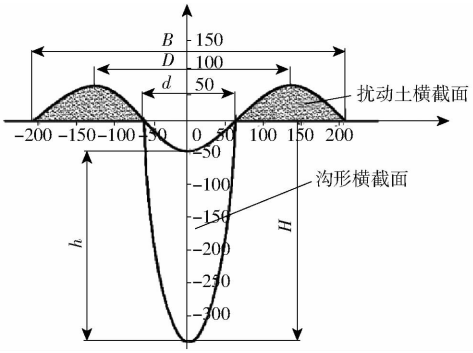


图 20　沟形示意图

Fig. 20　Diagram of soil groove

3.4　试验结果与分析

犁底层深度土壤容重如表 4 所示。

表 4　土壤容重统计

Tab. 4　Soil bulk density statistics　　g/cm³

深松铲类型	含水率/%	速度/(km·h⁻¹)		
		1	2	3
圆弧式	14 ± 1	1. 20	1. 19	1. 20
	20 ± 1	1. 17	1. 17	1. 17
	26 ± 1	1. 12	1. 10	1. 07
折线式	14 ± 1	1. 23	1. 24	1. 21
	20 ± 1	1. 12	1. 10	1. 10
	26 ± 1	1. 09	1. 07	1. 07
拟合曲线型	14 ± 1	1. 26	1. 24	1. 23
	20 ± 1	1. 17	1. 16	1. 09
	26 ± 1	1. 07	1. 07	1. 05

记录并计算出试验所得数据，建立 3 种深松铲的扰动面积与速度、耕作阻力与速度在不同含水率下的效果对比图。

由图 21 得，扰动面积随着速度的增加而增大。同一工况下圆弧式深松铲的土壤扰动面积大于折线式深松铲，折线式深松铲土壤扰动面积大于拟合曲线型深松铲；在牵引阻力方面，折线式深松铲大于圆弧式深松铲，圆弧式深松铲大于拟合曲线型深松铲。圆弧式、折线式、拟合曲线型深松铲平均扰土面积为 8 749. 6、6 377. 4、2 959. 13 mm²，平均阻力为 1 976、1 779. 3、1 260. 1 N。拟合曲线型深松铲土壤扰动量比折线式和圆弧式减少 53. 6%、66. 18%，耕作阻力减少 36. 23%、29. 18%。因此在深松铲的作用效果方面，拟合曲线型深松铲比其它深松铲性能较优。并由表 4 得，深松铲的作用能显著减小土壤容重，达到对犁底层的深松效果。

4　田间对比试验

4.1　试验目的与条件

本次试验田间土壤平均含水率为(20 ± 1)%，未涉及到粘土量，且土壤板结较严重。因此选择土壤扰动量为指标，对拟合曲线型、圆弧式、折线式深松铲进行对比试验，并探究深松部件对犁底层土壤容重的影响，2017 年 5 月在黑龙江省东北农业大学试验田进行田间试验，如图 22 所示。

试验区长 50 m、宽 6 m、土壤厚度 1 m，其土壤为典型东北壤土。平均土壤容重为 1. 50 g/cm³，土壤硬度分别为：1 526 kPa(0 ~ 125 mm)、3 649 kPa(125 ~ 250 mm)、2 433 kPa(250 ~ 300 mm)，调节限深轮与铲尖的高度差保证所设计 3 段工作刃与试验区相应土层相对应。试验所用器材有约翰迪尔 484 型拖拉机、深松施肥机(仅深松部件工作)、3 种深松铲。

4.2　试验方案

拖拉机以正常田间作业 2 km/h 的速度进行深松作业，深松深度为 300 mm。借鉴文献[33 - 34]对触土部件工作性能的评价方法，选取回土面积作为深松铲扰动量的评价指标。利用沟形轮廓仪[32]先对 3 种深松铲自然回土的横截面积进行测量，在坐标纸上绘制沟形曲线；而后将沟内回落土壤扒出，使

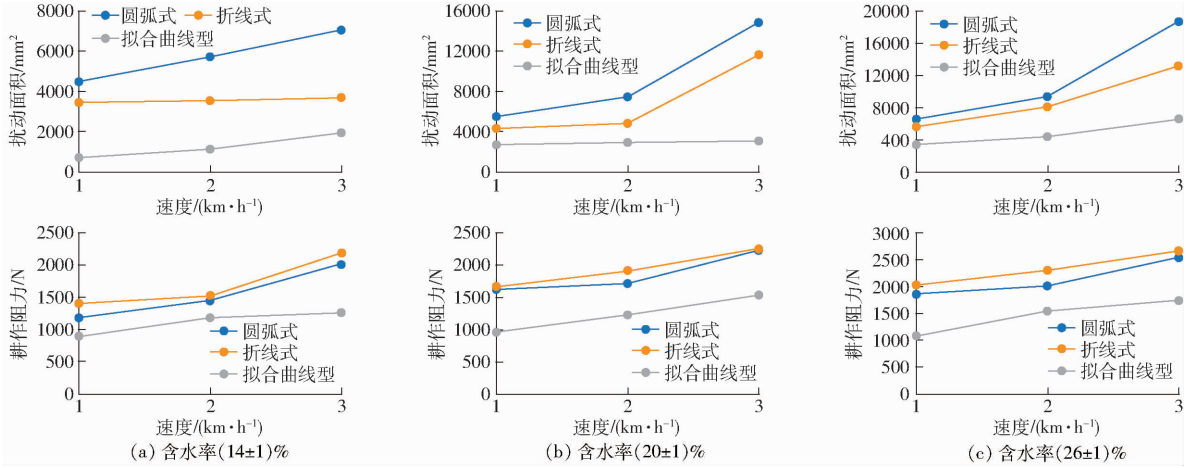
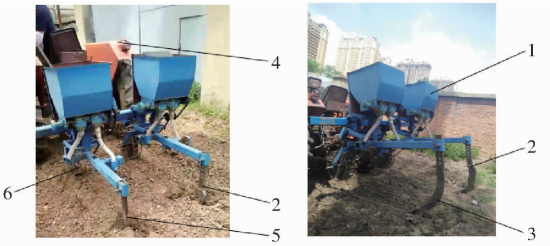


图 21　扰动面积与耕作阻力的性能对比

Fig. 21　Comparisons of performance between disturbed area and tillage resistance



试验设备



试验地形

图 22 田间试验

Fig. 22 Field tests

1. 深松施肥机 2. 拟合曲线型深松铲 3. 圆弧式深松铲 4. 约翰迪尔 484 型拖拉机 5. 折线式深松铲 6. 限深轮

其深度达到开沟深度,利用同一张坐标纸再次绘制沟形曲线。其回土面积示意图如图 23 所示,每种深松铲所开沟形随机测量 5 次,测量出回土面积,求其平均值。并随机选取各深松铲作业后的犁底层土壤样本 5 次,计算其土壤容重。

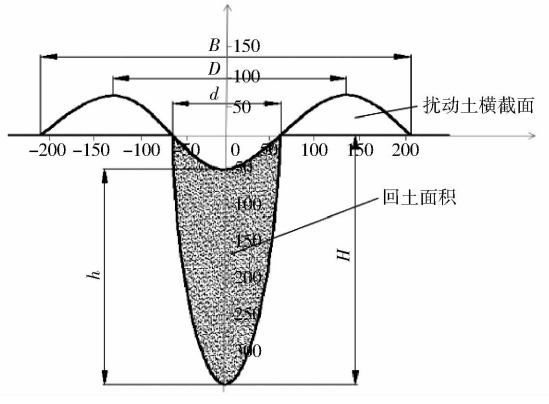
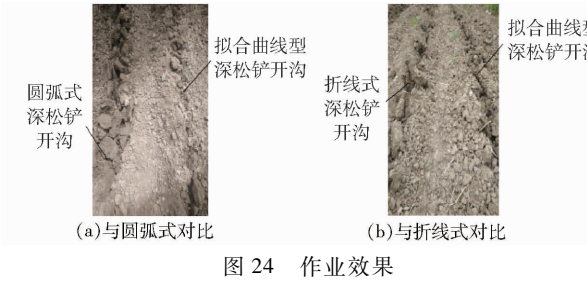


图 23 田间试验沟形示意图

Fig. 23 Diagram of soil groove in field tests

4.3 试验结果

作业效果如图 24 所示。



(a)与圆弧式对比 (b)与折线式对比

图 24 作业效果

Fig. 24 Operation effect

依据文献[33-36],土壤的扰动量可以由其回土量的多少来反映,相同深松深度条件下,回土量越大,其土壤扰动量越小,深松区域土壤越松散,效果越好;反之,回土量越小,其扰动量越大,深松区域土壤越少,水肥散失越严重。土壤容重则对作物苗期生长有显著性影响[37-38],3 种铲型的回土量及犁底层土壤容重如表 5 所示。

表 5 验证试验结果

Tab. 5 Verification results of test

深松铲类型	回土面积/mm^2	犁底层土壤容重/(g·cm^{-3})
拟合曲线型	7 745.4	1.34
折线式	4 278.6	1.20
圆弧式	3 136.4	1.29

由表 5 各种深松铲的指标平均值可知,拟合曲线型深松铲的回土面积大于折线式,折线式深松铲的回土面积大于圆弧式;拟合曲线型深松铲的土壤扰动量小于折线式,折线式深松铲的土壤扰动量小于圆弧式,因此拟合曲线型深松铲深松效果最优。3 种深松铲作业能够显著减小犁底层土壤容重,达到打破犁底层的要求。

5 结论

(1)依据深松铲铲尖运动的离散元(DEM)仿真试验分析,设计了拟合曲线型深松铲,并通过铲柄与铲尖互作效应仿真试验验证了设计思路的可行性与合理性。所设计拟合曲线型深松铲可以有效减小耕作阻力和表层土壤的扰动量,同时打破犁底层,降低犁底层的土壤容重。

(2)对所设计的拟合曲线型深松铲与其他类型深松铲进行土槽对比试验,测出拟合曲线型深松铲比折线式深松铲土壤扰动量减少了 53.6%,耕作阻力减少了 36.23%;拟合曲线型深松铲比圆弧式深松铲土壤扰动量减少了 66.18%,耕作阻力减少了 29.18%。验证拟合曲线型深松铲牵引阻力最小,土壤扰动量最小,指标较优。并且减小犁底层土壤容重,达到打破犁底层的要求。

(3)对拟合曲线型深松铲与其他类型深松铲进行田间对比试验,进一步证明拟合曲线型深松铲能够减小犁底层土壤容重,达到打破犁底层的要求。测出拟合曲线型、折线式、圆弧式深松铲的回土面积分别为 7 745.4、4 278.6、3 136.4 mm^2,分别增加 81.03% 和 146.95%,验证了拟合曲线型深松铲比其他类型深松铲在回土面积指标上较优。田间试验与土槽试验均说明,拟合曲线型深松铲深松作业时土壤扰动量较小,更符合保护性耕作的要求。

参 考 文 献

1 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与深松效果研究[D]. 长春:吉林农业大学,2014.
WANG Yan. Simulation analysis of structure and effect of the subsoiler based on DEM[D]. Changchun: Jinlin Agricultural University, 2014. (in Chinese)

2 龚皓晖. 基于土壤力学模型的深松铲有限元分析与结构优化[D]. 成都:西华大学,2013.
GONG Haohui. Finite element analysis and structure optimization for subsoiling shovel based on soil mechanics model[D]. Chengdu:Xihua University, 2013. (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 SHAHGOLIA G, FIELKE J, SAUNDERS C, et al. Simulation of the dynamic behaviour of a tractor-oscillating subsoiler system [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2):147 - 155.

5 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)

6 张强,张璐,刘宪军,等. 基于有限元法的仿生钩形深松铲耕作阻力[J]. 吉林大学学报:工学版,2012,42(增刊 1):117 - 121.
ZHANG Qiang, ZHANG Lu, LIU Xianjun, et al. Soil resistance of the bionic hook-shape subsoiler based on the finite element method[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition, 2012, 42(Supp. 1):117 - 121. (in Chinese)

7 龚皓晖,王霜. 仿生深松铲结构设计与有限元分析[J]. 农机化研究,2013,35(7):53 - 57.
GONG Haohui, WANG Shuang. Bionic subsoiler sructural design with the finite element analysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(7):53 - 57. (in Chinese)

8 张金波,佟金,马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):141 - 145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140422&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022.
ZHANG Jinbo,TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):141 - 145. (in Chinese)

9 朱风武,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 bubsoiling techniques[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition, 2003, 33(2):95 - 99. (in Chinese)

10 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):80 - 88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160712&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):80 - 88. (in Chinese)

11 于建群,钱立彬,于文静,等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报,2009,40(6):53 - 57.
YU Jianqun, QIAN Libin, YU Wenjing, et al. Discrete element method of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):53 - 57. (in Chinese)

12 丁启朔. 耕作力学研究的土壤结构及其评价方法[D]. 南京:南京农业大学,2006.
DING Qishuo. Soil structure and its assessment for soil tillage research[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese)

13 丁启朔,任骏,BELAL Eisa Adam,等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3):38 - 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170305&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/jissn.1000-1298.2017.03.005.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):38 - 48. (in Chinese)

14 孟凤英. 粘性土壤破碎机理及分形规律研究[D]. 南京:南京农业大学,2009.
MENG Fengying. A study on the fragmentation mechanism of cohesive soil and its fractal characteristics [D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2009. (in Chinese)

15 周祖锷. 农业物料学[M]. 北京:中国农业出版社,1994.

16 JB/T 9788—1999　深松铲和铲柄[S]. 1999.

17 胡建平,周春健,侯冲,等. 磁吸板式排种器充种性能离散元仿真[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):94 - 98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140216&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.016.
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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):94 - 98. (in Chinese)

18 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)

19 曹秀振. 基于离散元法的免耕播种开沟器的设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
CAO Xiuzhen. Design and test of no-till seeding opener on discrete element method [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)

20 MUSTAFA U, JOHN M F, CHRIS S. Three dimensional discrete element modeling DEM of tillage accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129:298 - 306.

21 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.

22 吉尔 W R,范德伯奇 G E. 耕作和牵引土壤动力学[M]. 耕作和牵引土壤动力学翻译组,译. 北京:中国农业机械出版社,1983.

23 DAMORA D, PANDEY K P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed and fertilizer drills[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 34(2): 127 - 139.

24 TESSIER S, SAXTON K E, PAPENDICK R I, et al. Zero-tillage furrow opener effects on seed environment and wheat emergence [J]. Soil and Tillage Research, 1991, 21(3 - 4):347 - 360.

25 赵喜安. 公路线形的线元设计法[J]. 公路,1995(3):24 - 27.

26 张耀,曹小平,王春芬,等. 材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2015.

27 GILL W R, VANDEN B, GLEN E. Soil dynamics in tillage and traction[M]. Agriculture Hanbook No. 316. United States Department of Agriculutre, 1967.

28 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)

29 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.

30 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. 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.
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. (in Chinese)

31 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. 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.
LIU Junan, 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. (in Chinese)

32 AILI Hasimu, CHEN Ying. Soil disturbance and draft force of selected seed openers[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 140: 48 - 54.

33 赵淑红,刘宏俊,张先民,等. 滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J]. 农业工程学报,2016,32(19):26 - 34.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, ZHANG Xianmin, et al. Design and optimization experiment of working performance of sliding push opener[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19):26 - 34. (in Chinese)

34 陈玉仑. 稻麦联合收获开沟埋草多功能一体机的设计[D]. 南京:南京农业大学,2009.
CHEN Yulun. Design of harvest ditch and stank-disposing machine[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)

35 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等. 仿形滑刀式开沟器设计试验[J]. 农业工程学报,2017,33(4):16 - 24.
JIA Honglei, ZHENG Jiaxin, YUAN Hongfang, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):16 - 24. (in Chinese)

36 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 forecd-vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):17 - 24. (in Chinese)

37 李潮海,周顺利. 土壤容重对玉米苗期生长的影响[J]. 华北农学报,1994,9(2):49 - 54.
LI Chaohai, ZHOU Shunli. Influence of volume weight of soil on maize seedings growth[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1994, 9(2):49 - 54. (in Chinese)

38 李潮海,梅沛沛,王群,等. 下层土壤容重对玉米植株养分吸收和分配的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(7):1371 - 1378.
LI Chaohai, MEI Peipei, WANG Qun, et al. Influences of soil bulk density in deep soil layers on absorption and distribution of nitrogen phosophrous and potassium in maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(7):1371 - 1378. (in Chinese)