

# 高速犁体曲面结构参数对耕作阻力的影响研究<sup>\*</sup>

赵雪彦<sup>1†</sup> 司冰权<sup>1</sup> 宋正河<sup>1</sup> 陈雪冬<sup>2</sup> 张有强<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学 工学院, 北京 100083)

(2. 中国农业大学 理学院, 北京 100083)

(3. 塔里木大学 机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300)

**摘要** 针对我国铧式犁高速作业时耕作阻力大、耕地质量差等问题, 本文研究了高速犁体曲面结构参数对耕作阻力的影响. 首先, 分析了基于水平直线法的高速犁体曲面形成过程, 得出对高速犁体曲面作业性能影响较大的结构参数. 然后, 基于离散元法建立了高速犁体曲面-土壤互作模型, 并通过土槽试验和仿真试验验证了该模型的合理性. 最后, 分别研究了铧刃角  $\theta$ 、导曲线开度  $l$ 、犁铧安装角  $\epsilon$  和高度偏差量  $\Delta H$  等结构参数对耕作阻力的影响规律. 研究表明: 随着铧刃角的增大, 耕作阻力以较快速度增大; 随着导曲线开度的增大, 耕作阻力逐渐减小; 随着犁铧安装角的增大, 耕作阻力在较小范围内波动; 随着高度偏差量的增大, 耕作阻力缓慢增大.

**关键词** 高速犁体曲面, 水平直线法, 离散元法, 耕作阻力

**中图分类号**: TP242; TM615

**文献标志码**: A

## Effect of Structural Parameters of Plow Body Surface on Tillage Resistance<sup>\*</sup>

Zhao Xueyan<sup>1†</sup> Si Bingquan<sup>1</sup> Song Zhenghe<sup>1</sup> Chen Xuedong<sup>2</sup> Zhang Youqiang<sup>3</sup>

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

(2. College of Science China Agricultural University, Beijing 100083, China)

(3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

**Abstract** In response to the problems of high tillage resistance, high energy consumption and poor tillage performance during high-speed operation of the plow in China, this paper investigates the structural parameters of the high-speed plow body surface on tillage resistance. First, the formation process of high-speed plow body surface based on the horizontal straight element line method is analyzed, and the structural parameters that have a great influence on the operational performance of high-speed plow body surface are derived. Then, based on the discrete element method, a dual soil layer structure containing a tillage layer and a plow base layer is established, and the soil properties and the interaction between the plow surface and the soil are characterized by suitable contact relations and contact parameters, and then a high-speed plow surface-soil interaction model is established. The rationality of the high-speed plow body surface-soil interaction model is demonstrated through soil flume tests and simulations of plowing operations. Finally, the influence of structural parameters such as share edge angle  $\theta$ , guide curve opening  $l$ , plowshare mounting angle  $\epsilon$  and height deviation amount  $\Delta H$  on tillage resistance are studied re-

2023-08-03 收到第 1 稿, 2023-09-11 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 北京自然科学基金(3184053), 塔里木大学现代农业工程重点实验室开放课题(TDNG2022105), 中央高校基本科研业务费专项资金(2022TC120), Beijing Natural Science Foundation(3184053), Open Subjects in the Key Laboratory of Modern Agricultural Engineering, Tarim University (TDNG2022105), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2022TC120).

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail: xyzhao@cau.edu.cn

spectively. The results show that the tillage resistance increases at a faster rate as the angle of the share blade increase; as the opening of the guide curve increases, the tillage resistance decreases gradually; as the ploughshare mounting angle increases, the tillage resistance fluctuates within a small range; the tillage resistance increases slowly as the height deviation increases. The results of this paper can provide a significant reference for the structural optimization design of high-speed plow surfaces.

**Key words** high-speed plow surface, discrete element method, horizontal straight element line method, tillage resistance

## 引言

随着我国农业机械化水平的提高,大马力拖拉机已经基本能够实现高速犁耕作业,国内科研人员尝试用大马力拖拉机牵引普通铧式犁进行高速犁耕作业,但大量试验研究表明,普通铧式犁作业速度过高会导致耕作阻力急剧变大,并且土垡被抛掷较远,导致犁沟过宽,犁体曲面作业质量变差<sup>[1]</sup>.因此,实现高速犁耕作业必须研制能够适应较高耕速的犁体曲面.一般将能够适应7km/h作业速度的犁称为高速犁.相对于普通铧式犁,高速犁在高速作业时有着较好的耕地性能<sup>[2]</sup>.但是,我国所用高速犁目前主要依靠进口,成本较高,国产高速犁在犁耕阻力和作业质量等方面与进口高速犁存在一定差距<sup>[3]</sup>.高速犁耕作业模式的推广要求对国产高速犁进行优化以适应高速作业性能要求.

国内外科研人员针对犁体曲面结构设计及优化进行了大量理论和试验研究.赵永满等分析了高速犁体曲面结构,说明了高速犁与常速犁在性能和参数方面的差异,并给出了主要参数的选择范围,但该文章只进行了理论方面的研究,缺乏试验支撑<sup>[4]</sup>.何永强等基于离散元法搭建了犁体曲面—土壤仿真模型,进行了铧刃角、犁铧安装角、导曲线扣垡角等犁体曲面结构参数的优化,并以最小耕作阻力为优化目标求解了最优的结构参数组合<sup>[5]</sup>.吴声昌等建立了以功耗为目标函数,犁体曲面参数范围为约束条件的犁体曲面优化模型,得到了犁体曲面起土角、铧刃角、犁铧安装角等最优参数组合,但该文章没有对改进后的犁体曲面进行试验验证<sup>[6]</sup>.张建国通过数字化土槽平台系统对犁体进行了犁耕阻力测试试验,得出了耕速和耕深等工作参数和推土角、起土角和顶边线高度等结构参数对犁体耕作阻力的影响规律,但该文章并未进行理论方面的分析,缺乏理论指导<sup>[7]</sup>.Mootaz等采用有限元方法,

建立了推土板和土块的相互作业模型,借助仿真分析得出了推土板结构参数对耕作阻力的影响<sup>[8]</sup>.综上所述,对于犁体曲面的结构优化,多数都是在常速犁的基础上修改部分参数,使得修改后的犁体曲面能够适应较高的作业速度,并以犁体曲面耕作阻力、碎土率等作业性能指标为目标函数,寻求所修改参数的最优组合,但是这些研究忽略了犁体曲面参数对其作业性能影响规律的研究.虽然部分学者采用有限元的方法研究了结构参数与耕作阻力之间的关系,但是有限元法主要用于连续性接触问题的研究,而土壤颗粒是离散存在的,这使得采用有限元法不能很好地表征土壤特性,造成仿真结果与实际情况有一定的差异.因此本文采用离散元法研究犁体曲面结构参数对犁体曲面耕作阻力的影响规律.

本文首先分析基于水平直元线法的犁体曲面形成过程,得出对高速犁体曲面作业性能影响较大的结构参数;然后基于离散元法建立包含耕作层和犁底层的双土层结构,并建立高速犁体曲面—土壤交互模型;最后基于该模型研究犁体曲面结构参数对犁体曲面耕作阻力的影响规律.

## 1 高速犁体曲面形成过程分析

高速铧式犁工作部件主要包括犁铧、犁壁、犁柱、犁托、犁侧板等,其中,犁铧和犁壁共同构成犁体曲面,如图1所示.犁体曲面与土壤直接接触并对土壤进行犁耕作业,是决定高速犁耕地性能的核心零部件<sup>[9]</sup>.

形成高速犁体曲面的方法有多种,如水平直元线法,倾斜直元线法,曲元线法等,其中水平直元线法绘制的犁体曲面性能较好,被广泛应用.但传统水平直元线法设计犁体曲面设计过程中存在计算过程繁琐、计算量大以及部分关键参数值难以确定等问题.针对上述问题,作者提出了一种适用于高速犁体曲面规范化设计的方法,明确了犁体曲面设

计过程中所需参数及数值计算方法,并基于该方法给出了犁体曲面建模的具体过程,详细论述请参考文献[10].因此本节基于提出的高速犁体曲面参数规范化设计方法对高速犁体曲面的成型过程进行分析,确定对犁体曲面空间构型影响较大的参数,该方法设计犁体曲面主要包括主视图设计、导曲线设计、水平直线设计以及犁体曲面成形设计.

高速犁体曲面主视图用于确定犁体曲面轮廓,如图2所示,其主要参数有胛刃线高度 $H$ 、顶边线高度 $H_{\max}$ 、翼边线夹角 $\delta$ ,主要参数计算方法如公式(1).

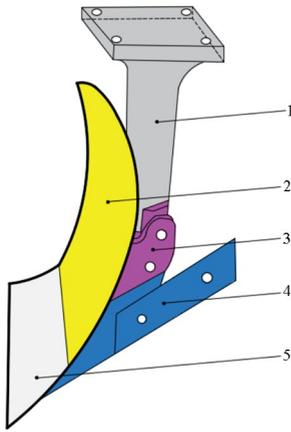


图1 高速犁结构

1—犁柱;2—犁壁;3—犁托;4—犁侧板;5—犁铧

Fig. 1 High-speed plow structure; 1—Plow pillar; 2—Plow moldboard; 3—Plow support; 4—Plow side plate; 5—Plow share

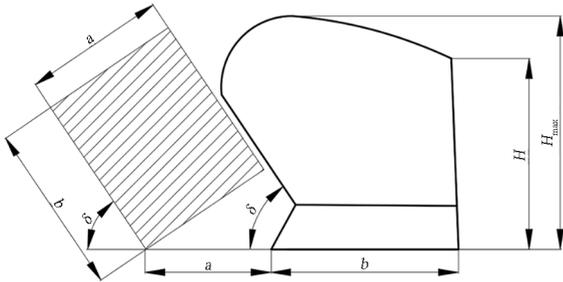


图2 犁体曲面主视图

Fig. 2 Main view of plow surface

$$\begin{cases} H = b \\ H_{\max} = \sqrt{a^2 + b^2} \pm \Delta H \\ \delta = \arcsin \frac{a}{b} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $a$ 为犁耕深度, $b$ 为犁耕幅宽, $\Delta H$ 为犁体曲面高度偏差量.

犁体曲面导曲线为水平直元线的控制线,如图3所示,其主要参数为犁体曲面导曲线开度 $l$ 、犁铧安装角 $\epsilon$ 、导曲线切线夹角 $\lambda$ 、导曲线高度 $H_d$ ,主要

参数计算方法如公式(2).

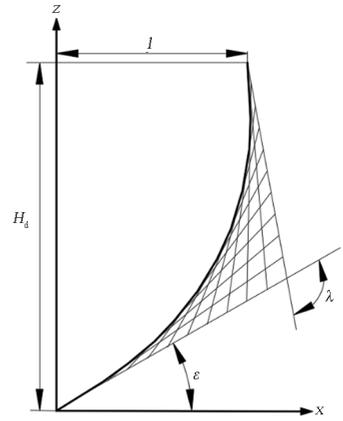


图3 犁体曲面导曲线

Fig. 3 Plow surface guide curve

$$\begin{cases} l = C_1 b (\cos \Delta \epsilon - \sin \epsilon) \\ \lambda = \left( \frac{\pi}{2} - \Delta \epsilon \right) + \epsilon \\ H_d = C_h l \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Delta \epsilon$ 为导曲线覆土角, $C_1$ 、 $C_h$ 为修正系数.

水平直线是导曲线生成连续曲面的引导线.根据元线角变化规律,元线角可分为线性和非线性两部分.线性部分的元线角由初始元线角即犁刃角 $\theta$ 线性变化至最小元线角 $\theta_{\min}$ ,碎土型高速犁体曲面直元线主要参数计算方法如公式(3).

$$\begin{cases} \theta_i = \theta - \left( \frac{\theta - \theta_{\min}}{n} \right) i \\ Z_i = \frac{Z_{\min} i}{n} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\theta_i$ 为第 $i$ 条直元线的元线角, $Z_{\min}$ 为直元线的最低高度, $Z_i$ 为第 $i$ 条直元线的高度, $i=0,1,2,\dots,n$ , $n$ 为线性部分直元线的数量.

非线性部分的元线角由最小元线角 $\theta_{\min}$ 非线性变化至最大元线角 $\theta_{\max}$ ,主要参数计算方法如公式(4).

$$\begin{cases} \varphi_j = \theta_{\min} + \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{y_{\max}} y_j \\ y_{\max} = \frac{6.2(Z_{\max} - Z_{\min})^2}{(Z_{\max} - Z_{\min})^2 + 10000} \\ y_j = \frac{6.2j^2(Z_{\max} - Z_{\min})^2}{j^2(Z_{\max} - Z_{\min})^2 + 10000k^2} \\ H_j = Z_{\min} + \frac{(Z_{\max} - Z_{\min})j}{k} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\varphi_j$ 为第 $j$ 条直元线的元线角, $y_j$ 为元线角变化过程中第 $j$ 条直元线的高度变化量, $y_{\max}$ 为元线

角变化过程中直元线最大高度变化量,  $H_j$  为第  $j$  条直元线的高度,  $j = 0, 1, 2, \dots, k$ ,  $k$  为非线性部分直元线的数量。

高速犁体曲面成形设计主要确定犁体曲面的空间形状。以导曲线为截面线, 水平直元线为引导线, 生成连续曲面, 然后在与连续曲面夹角为铧刃角的方向上, 将正视图投影至连续曲面上, 得到犁体曲面空间形状。

由水平直元线法形成犁体曲面过程可以发现, 适当增大高度偏差量  $\Delta H$  可以使犁体曲面犁翼伸展变长, 防止高速犁耕作过程中过多土垡越过顶边线, 降低犁体曲面的翻垡性能。导曲线开度  $l$  和犁铧安装角  $\epsilon$  会影响犁体曲面的扭转程度和弯曲程度, 从而影响犁体曲面的耕作阻力和碎土性能。铧刃角  $\theta$  的大小对犁体曲面的工作性能也有着重要影响, 当铧刃角较小时, 犁体曲面铧尖部分强度较弱, 遇到冲击容易折断; 当铧刃角较大时, 犁体曲面滑切作用减弱, 进而影响耕作阻力。因此, 本文研究高度偏差量  $\Delta H$ 、导曲线开度  $l$ 、犁铧安装角  $\epsilon$  和铧刃角  $\theta$  对高速犁体曲面耕作阻力的影响。

## 2 高速犁体曲面—土壤互作模型建立及验证

### 2.1 基于离散元法的犁体曲面—土壤互作模型建立

土壤主要由土壤颗粒组成, 是典型的离散体, 但是土壤颗粒不是简单地、机械地混合在一起, 而是相互联系、相互制约地构成土壤团聚体。离散元法可以通过设置合理的离散单元参数和土壤颗粒间的接触模型表征土壤颗粒之间的相互作用关系, 还可以对犁耕过程进行仿真分析获得耕作阻力, 因此本文采用离散元法建立犁体曲面—土壤互作模型, 进而研究犁体曲面结构参数对其耕作阻力的影响规律。

在犁耕作过程中, 土壤颗粒所受的力主要是颗粒之间接触产生的接触力及颗粒与犁体曲面接触产生的相互作用力, 颗粒之间及颗粒与犁体表面之间的接触形式及等效力学模型可用图 4 来表示, 图中颗粒 A、B 为接触颗粒,  $R_A$ 、 $R_B$  为颗粒半径,  $a$ 、 $\delta$  分别为颗粒间的接触圆半径、接触变形量,  $a'$ 、 $\delta'$  分别为颗粒与边界间的接触圆半径及接触变形量,  $K_n$ 、 $K_t$  分别为振动系统模型中法向、切向刚度,  $C_n$ 、 $C_t$  分别为振动系统模型中法向、切向阻尼系数,  $\chi$  为摩擦系数。

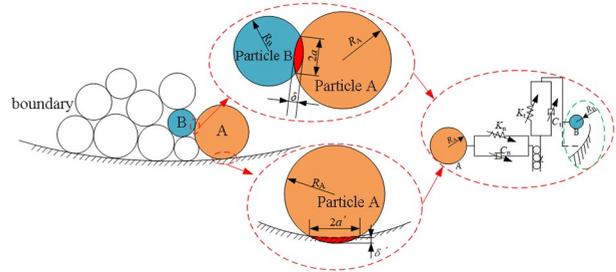


图4 土壤颗粒的接触形式及等效力学模型  
Fig. 4 Contact forms and equivalent mechanical modelling of soil particles

由图 4 所示的等效模型可知, 颗粒之间和颗粒与边界间的相互作用力均为接触力, 在理论分析过程中可表示成相似的形式进行分析, 因此本文主要基于对颗粒间的接触进行土壤颗粒受力运动的理论分析及接触力的计算。在犁耕作时, 土壤颗粒的受力运动又可分解为法向运动、切向运动及滑动或滚动, 各运动方向上的等效力学模型如图 5(a)、(b)和(c)所示。将颗粒接触过程中的振动运动进行法向和切向方向的分解, 根据颗粒的法向受力情况及牛顿第二定律, 颗粒接触过程中的法向运动微分方程如公式(5)所示, 根据颗粒的切向受力情况, 切向运动表现为颗粒的切向滑动或颗粒的滚动, 根据牛顿第二定律可知, 颗粒的运动微分方程如公式(6)和公式(7)所示。

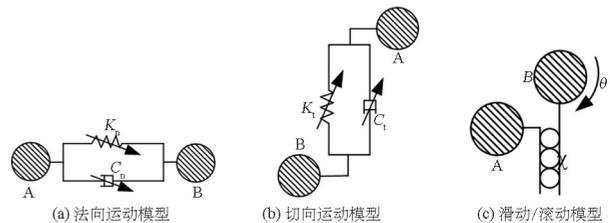


图5 法向、切向运动模型及滑动模型  
Fig. 5 Normal and tangential motion model and sliding model

$$m^* \ddot{x}_n + f_{cn}(C_n, \dot{x}_n) + f_{kn}(K_n, x_n) = f_n \quad (5)$$

$$m^* \ddot{x}_t + f_{ct}(C_t, \dot{x}_t) + f_{kt}(K_t, x_t) = f_t \quad (6)$$

$$I^* \ddot{\theta} + [f_{ct}(C_t, \dot{x}_t) + f_{kt}(K_t, x_t)]r = M \quad (7)$$

式中,  $m^*$  为颗粒 A、B 的等效质量,  $I^*$  为颗粒 A、B 的等效转动惯量,  $r$  为旋转半径;  $x_n$ 、 $x_t$  分别为颗粒的法向和切向相对位移,  $\theta$  为颗粒自身的旋转角度,  $f_{cn}(C_n, \dot{x}_n)$ 、 $f_{kn}(K_n, x_n)$  分别为法向方向的阻尼力和弹簧力,  $f_{ct}(C_t, \dot{x}_t)$ 、 $f_{kt}(K_t, x_t)$  分别为切向方向的阻尼力和弹簧力,  $f_n$ 、 $f_t$  分别为颗粒所受的法向外力及切向外力,  $M$  为颗粒所受的外部转矩,  $K_n$ 、 $K_t$  分别为接触模型中的法向及切向

接触刚度,  $C_n$ 、 $C_t$  为接触模型中的法向及切向阻尼系数。

由于土壤模型中颗粒间的接触力为非线性接触力, 因此土壤颗粒接触中接触刚度—力及接触阻尼—力均为非线性关系. 土壤颗粒间的接触形式为 Hertz 接触, 由 Hertz 接触理论可知, 土壤颗粒间的法向接触力与颗粒位移的关系如公式(8)所示.

$$\begin{cases} F_n = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{\frac{1}{2}} \delta_n^{\frac{3}{2}} \\ E^* = \frac{1 - \mu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \mu_B^2}{E_B} \\ R^* = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $F_n$  为颗粒所受的法向力,  $E^*$ 、 $R^*$  分别为颗粒 A、B 的等效弹性模量和等效半径,  $E_A$ 、 $E_B$  分别为颗粒 A、B 的弹性模量,  $\mu_A$ 、 $\mu_B$  分别为颗粒 A、B 的泊松比,  $R_A$ 、 $R_B$  分别为颗粒 A、B 的半径,  $\delta_n$  为颗粒接触法向变形量, 即接触颗粒的法向相对位移。

由公式(8)可知, 土壤接触模型法向接触力与颗粒位移为非线性关系, 且力与位移的 3/2 次方为成正比关系, 位移的比例系数即为接触模型的法向刚度, 如公式(9)所示.

$$K_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (9)$$

根据 Mindlin 接触理论切向接触力求解方法, 土壤颗粒间的切向接触力与颗粒位移的关系如公式(10)所示.

$$\begin{cases} F_t = 8G^* \sqrt{R^*} \delta_n \delta_t \\ G^* = \frac{1 - \mu_A}{G_A} + \frac{1 - \mu_B}{G_B} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $G^*$  为接触颗粒 A、B 的等效剪切模量,  $\delta_n$  和  $\delta_t$  分别为颗粒接触法向和切向相对位移,  $G_A$ 、 $G_B$  分别为颗粒 A、B 的剪切模量。

由公式(10)可知, 切向接触力受颗粒接触过程中法向和切向变形量的影响, 取切向位移的比例系数为切向刚度, 得到接触模型的切向刚度如公式(11)所示.

$$K_t = 8G^* \sqrt{R^*} \delta_n \quad (11)$$

由公式(11)可知, 切向刚度受法向接触变形的影响, 因此颗粒接触过程中的切向刚度为变刚度。

对于非线性粘性阻尼系数的计算, 采用 Tsuji 提出的计算方法, 如公式(12)所示.

$$\begin{cases} C = \alpha \sqrt{m^* K} \delta^{\frac{1}{4}} \\ \alpha = -\ln(e) \sqrt{\frac{5}{\pi^2 + \ln^2(e)}} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $K$  为接触刚度, 当  $K$  为基于 Hertz 接触理论计算的非线性接触刚度  $K_n$  时,  $C$  为法向阻尼系数  $C_n$ , 当  $K$  为基于 Mindlin 接触理论计算的非线性接触刚度  $K_t$  时,  $C$  为切向阻尼系数  $C_t$ ,  $\delta$  为接触颗粒在对应方向上的相对位移,  $\alpha$  为只取决于恢复系数的阻尼常数,  $e$  为恢复系数。

颗粒间接触的法向及切向阻尼力如公式(13)所示.

$$\begin{cases} F_n^d = C_n v_n^{\text{rel}} \\ F_t^d = C_t v_t^{\text{rel}} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $F_n^d$ 、 $F_t^d$  为颗粒所受的法向及切向阻尼力,  $C_n$ 、 $C_t$  为颗粒间接触的法向及切向阻尼系数,  $v_n^{\text{rel}}$ 、 $v_t^{\text{rel}}$  为接触颗粒法向及切向相对速度。

对于颗粒间接触的滑动模型, 颗粒切向滑动或颗粒滚动受到颗粒间摩擦力的影响. 如果两个颗粒在接触点没有相对运动, 则颗粒处于静摩擦状态; 如果切向力大于最大静摩擦力, 则颗粒在接触点会发生相对运动, 静摩擦状态转变为滑动摩擦或滚动摩擦状态; 在滑动或滚动摩擦中, 若接触点处有切向相对速度, 则两颗粒处于滑动摩擦状态, 若接触点处没有相对切向速度, 则接触颗粒处于滚动摩擦状态。

若颗粒间运动为切向滑动, 此时颗粒间滑动摩擦力符合库伦摩擦定律, 摩擦力与颗粒的法向接触力成正比, 计算如公式(14)所示<sup>[11]</sup>; 若颗粒间运动为滚动, 则颗粒间产生滚动摩擦力, 该摩擦力通过颗粒接触表面法向产生的摩擦力矩来表示, 如公式(15)所示.

$$F_s = \chi_s F_n \quad (14)$$

式中,  $F_s$  为滑动摩擦力,  $\chi_s$  为静摩擦系数.

$$F_d = -\chi_d F_n \omega D \quad (15)$$

式中,  $F_d$  为滚动摩擦力,  $\chi_d$  为动摩擦系数,  $D$  为接触到颗粒质心的距离,  $\omega$  为颗粒在接触点位置单位角速度矢量。

土壤在自然状态下颗粒间存在一定的粘聚力, 使土壤颗粒形成团聚体, 团聚体具有一定的力学特性, 影响犁耕作业时产生的耕作阻力, 因此本文采用在颗粒间添加粘键的方式表征土壤自然状态

下颗粒之间存在的粘聚力,如图6所示。

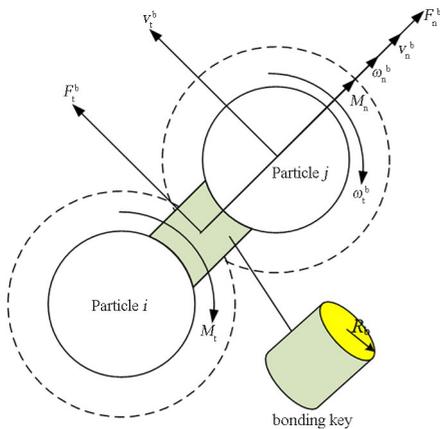


图6 颗粒间粘键结及受力

Fig. 6 Interparticle bonding bonds and forces

在土壤颗粒接触过程中,颗粒间会产生法向力、切向力、法向力矩及切向力矩,因此该粘键会受到这些力的作用,力及力矩的计算如公式(16)~公式(19)所示。

$$\begin{cases} F_n^b = -\int v_n^b K_n^b A_b dt \\ F_t^b = -\int v_t^b K_t^b A_b dt \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} M_n^b = -\int \omega_n^b K_t^b dt \\ M_t^b = -\int \omega_t^b K_n^b \frac{J}{2} dt \end{cases} \quad (17)$$

$$A_b = \pi R_b^2 \quad (18)$$

$$J = \frac{1}{2} \pi R_b^4 \quad (19)$$

式中,  $F_n^b$ 、 $F_t^b$ 、 $M_n^b$ 、 $M_t^b$  分别为颗粒之间粘键受到的法向和切向力及力矩,  $v_n^b$ 、 $v_t^b$  分别为颗粒法向和切向速度,  $K_n^b$ 、 $K_t^b$  分别为粘键法向、切向刚度,  $\omega_n^b$ 、 $\omega_t^b$  分别为颗粒法向、切向角速度,  $R_b$ 、 $A_b$ 、 $J$  分别为粘键截面半径、截面面积、截面惯性矩。

粘键由于力的作用受到的切向应力  $\tau_b$  及拉压应力  $\sigma_b$  的计算如公式(20)所示。

$$\begin{cases} \tau_b = -\frac{F_t^b}{A_b} + \frac{M_n^b}{J} R_b \\ \sigma_b = -\frac{F_n^b}{A_b} + \frac{2M_t^b}{J} R_b \end{cases} \quad (20)$$

当粘键实际受到的切应力、拉压应力超过该键的最大临界应力  $\tau_{max}$ 、 $\sigma_{max}$  时,粘键断裂,表示土壤颗粒间的粘键作用被破坏,此时土壤颗粒间没有粘键作用,颗粒的受力采用如图4所示颗粒间的力学模型进行分析。

自然界中土壤根据土层深度分为耕作层、犁底层和心土层,不同土层中的土壤性质不同.由于犁耕作业深度只涉及到耕作层和犁底层,因此本文在土壤建模时,仅考虑耕作层和犁底层两层土壤结构.根据耕作层和犁底层的土壤特性,通过设置不同的接触参数和粘键参数,可以建立包含耕作层和犁底层的双层土壤结构<sup>[12]</sup>.通过设置合理的犁体曲面材料参数和犁体曲面与土壤间的接触参数可以表征犁体曲面在作业过程中与土壤间发生的相互作用.本文犁铧和犁壁材料采用65Mn钢,不同土壤颗粒间的接触参数、不同土壤与犁体曲面的接触参数按照参考文献<sup>[13]</sup>进行标定,得到具体参数数值结果如表1所示。

表1 高速犁体曲面—土壤互作模型参数  
Table 1 Parameters of high speed plow surface-soil interaction model

Parameters		Numerical value
Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Tillage layer / Plow bottom layer /65Mn	2500/2650 /7850
Poisson's ratio/(Pa)	Soil/65Mn	0.25/0.35
Radius/(mm)	Soil particle/ Bond key	8/8.8
	Tillage layer-tillage layer	0.6
Recovery coefficient	Tillage layer soil -65Mn	0.4
	Plow bottom layer-plow bottom layer	0.6
Static friction coefficient	Plow bottom layer-65Mn	0.4
	Tillage layer-tillage layer	0.33
	Tillage layer soil -65Mn	0.3
Dynamic friction coefficient	Plow bottom layer-plow bottom layer	0.35
	Plow bottom layer-65Mn	0.425
	Tillage layer-tillage layer	0.14
Bond stiffness/( $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Tillage layer soil -65Mn	0.2
	Plow bottom layer-plow bottom layer	0.21
Critical stress/(Mpa)	Plow bottom layer-65Mn	0.2
	Bond key	$5 \times 10^5$
	Bond key	0.33

基于水平直元线法及参考文献<sup>[10]</sup>所示结构参数范围建立不同结构参数的高速犁体曲面;根据前文所述土壤颗粒间接触的受力分析,采用离散元方法结合表1所示土壤颗粒间及高速犁体曲面和土壤间的相互作用参数,可以建立高速犁体曲面—土壤互作模型,如图7所示.由图7可知犁体曲面—土壤模型包含耕作层和犁底层,高速犁体曲面从土壤模型左侧开始进行犁耕作业。

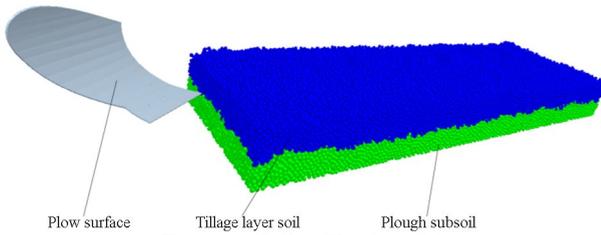


图7 高速犁体曲面-土壤模型

Fig. 7 High-speed plow surface-soil interaction model

## 2.2 高速犁体曲面犁耕过程仿真分析

基于建立的高速犁体曲面-土壤互作模型可以进行高速犁体曲面作业过程仿真并分析耕作阻力变化情况.当耕速为 $2.5\text{m/s}$ ,耕深为 $200\text{mm}$ 时,对犁角 $\theta=38^\circ$ 的高速犁体曲面进行犁耕作业仿真.仿真时间为 $3.0\text{s}$ 时的犁耕作业状态如图8所示,仿真试验得到犁体曲面耕作阻力 $R$ 随时间变化情况如图9所示.

由图8可以看出,高速犁体曲面作业时,土壤被切割形成土堡后被抛向一侧,形成犁沟,与实际犁

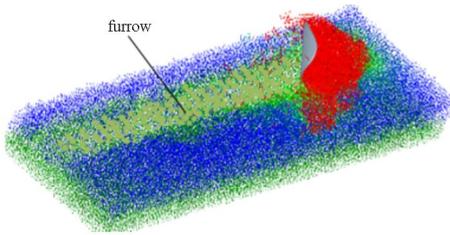
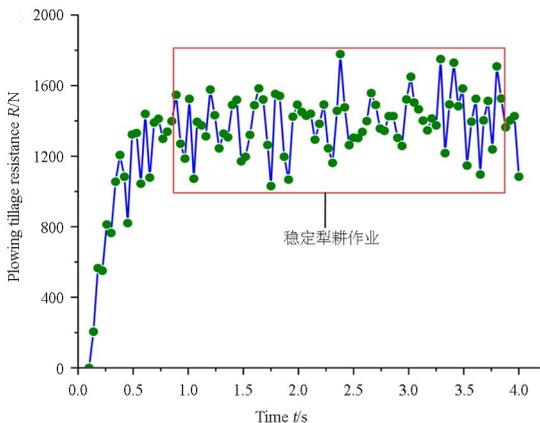
图8 高速犁体曲面 $3.0\text{s}$ 时的耕作状态Fig. 8 Operating status at  $3.0\text{s}$  for high-speed plow surface

图9 犁体曲面犁耕阻力随时间变化

Fig. 9 Plowing resistance of curved plow surface with time

耕作情况一致.由图9可知,当犁体曲面开始进入土体时,耕作阻力逐渐增加;在约 $1.0\text{s}$ 时,犁体曲面完全进入土体,随着犁体曲面继续前进,耕作阻力在一定范围内波动;在约 $3.8\text{s}$ 时,犁体曲面开始逐渐离开土体,耕作阻力开始下降.为了便于研

究高速犁体曲面结构参数对耕作阻力的影响,本文选取犁体曲面完全进入土体处于稳定作业状态时的耕作阻力进行分析,如图9中矩形框所示.

## 2.3 高速犁体曲面-土壤模型试验验证

基于智能型土壤-机器-植物系统技术平台搭建犁体耕作试验平台,并进行不同耕速工况下的犁耕阻力测试,通过对比分析仿真结果与试验结果验证高速犁体曲面-土壤互作模型的合理性.试验用犁耕作业机具为三铧犁,如图10所示.犁耕作业过程的耕作总阻力可通过阻力传感器进行实时测量并将结果反馈至采集系统,智能型土壤-机器-植物系统技术平台控制面板如图11所示.



图10 犁耕试验过程

Fig. 10 Test plowing process



图11 试验平台控制面板

Fig. 11 Test platform control panel

基于智能型土壤-机器-植物系统技术平台,共进行耕速为 $2\text{m/s}$ 、 $2.2\text{m/s}$ 和 $2.4\text{m/s}$ 三种工况下的室内土槽犁耕试验,耕深均为 $150\text{mm}$ ,耕作阻力处于稳定状态时的结果如图12所示.在进行仿真试验时,按照试验用三铧犁各犁体曲面空间摆放

位置设置仿真试验犁体曲面位置,建立三铧犁犁体曲面—土壤互作模型,进行耕速和耕深与试验工况一致的高速犁耕作仿真试验,互作模型如图 13 所示,仿真结果如图 14 所示。

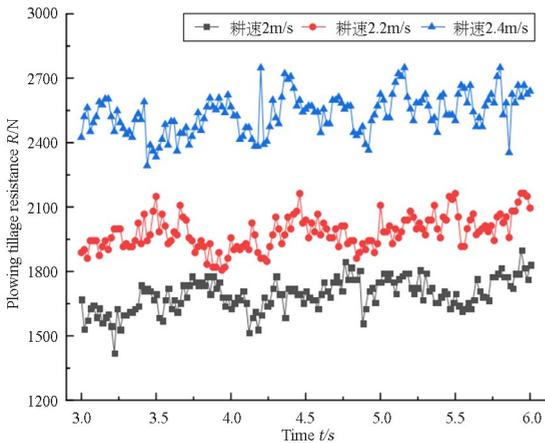


图 12 不同耕速下的土槽试验耕作阻力

Fig. 12 Experimental tillage resistance at different tillage speeds

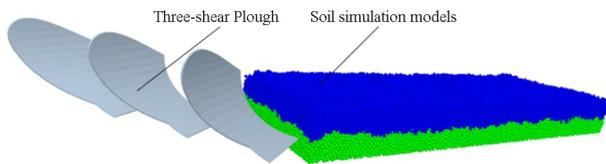


图 13 三铧犁犁体曲面—土壤互作模型

Fig. 13 Three plowshares plow surface-soil interaction model

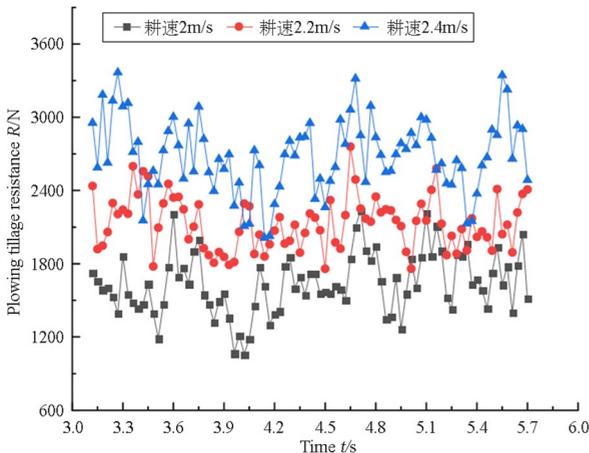


图 14 不同耕速下的仿真耕作阻力

Fig. 14 Simulated tillage resistance at different tillage speeds

对比图 12 和图 14 可知,随着耕速的增大,犁体曲面耕作阻力都呈现增大的趋势。仿真试验和土槽试验各耕速对应的平均耕作阻力、相对误差值如表 2 所示,其中,平均耕作阻力为稳定作业状态时阻力的均值,相对误差值为仿真试验与土槽试验平均耕作阻力的差值与土槽试验平均阻力的比值。

由表 2 可知相同作业工况下,相对误差值分别为 6.59%、6.75%、7.7%,误差均在 8% 以内,验证

了仿真模型的合理性。

表 2 仿真试验与土槽试验平均阻力  
Table 2 Average resistance of simulation experiment and soil tank experiment

Tillage speed / (m·s <sup>-1</sup> )	2.0	2.2	2.4
Simulation results /N	1632.3	2115.3	2673.6
Experiment results /N	1531.5	1981.5	2482.5
Relative error	6.59%	6.75%	7.7%

### 3 犁体结构参数对耕作阻力的影响分析

通过对犁体曲面形成过程进行分析可以得出犁刃角  $\theta$ 、导曲线开度  $l$ 、犁铧安装角  $\epsilon$ 、高度偏差量  $\Delta H$  等结构参数对犁体曲面形状的影响较大,进而影响犁体曲面的作业性能。本节基于建立的犁体曲面—土壤互作模型,研究犁体结构参数对耕作阻力的影响。

#### 3.1 犁刃角 $\theta$ 对耕作阻力的影响分析

基于前述水平直元线法建立以犁体曲面犁刃角  $\theta=35^\circ$  为起点,变化增量为  $1^\circ$ ,变化范围为  $35^\circ\sim 42^\circ$  的系列高速犁体曲面,并进行耕速为 2m/s,耕深为 200mm 的犁耕作仿真试验,得到犁体曲面平均耕作阻力  $R_p$ 。随犁刃角  $\theta$  的变化情况如图 15 所示。

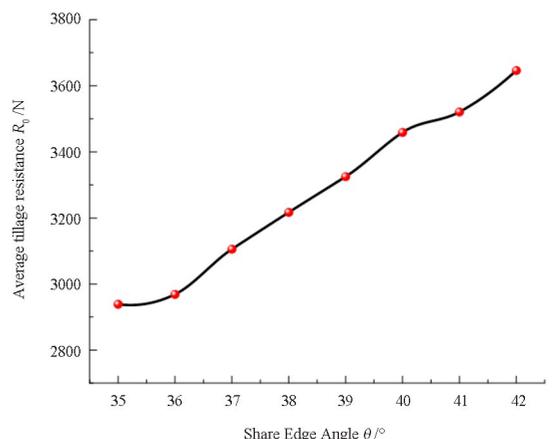


图 15 犁刃角  $\theta$  对平均耕作阻力的影响

Fig. 15 Influence of share edge angle  $\theta$  on average tillage resistance

由图 15 可知,随着犁体曲面犁刃角  $\theta$  的增大,平均耕作阻力呈现明显的上升趋势,并且上升幅度较大,这表明犁体曲面犁刃角对耕作阻力的影响较大。耕作阻力出现这种变化的原因是:随着犁刃角的增大,犁尖与土壤表面的夹角逐渐增大,犁尖对

土体的滑切作用减弱,切割土体时犁体曲面受到的冲击变大,耕作阻力随之增大.虽然较小的犁刃角会使得平均耕作阻力降低,但犁刃角过小会使得犁尖强度降低,在耕作过程中易出现犁尖崩断现象,因此在设计犁体曲面犁刃角时,在满足犁刃角强度的前提下,尽可能选择小的犁刃角.

### 3.2 导曲线开度 $l$ 对耕作阻力的影响分析

基于前述水平直线法建立以犁体曲面导曲线开度  $l=290\text{mm}$  为起点,变化增量为  $5\text{mm}$ ,变化范围为  $290\text{mm}\sim 340\text{mm}$  的系列高速犁体曲面,并进行耕速为  $2\text{m/s}$ ,耕深为  $200\text{mm}$  的进行犁耕作业仿真试验,得到犁体曲面平均耕作阻力  $R_0$ .随导曲线开度  $l$  的变化情况如图 16 所示.

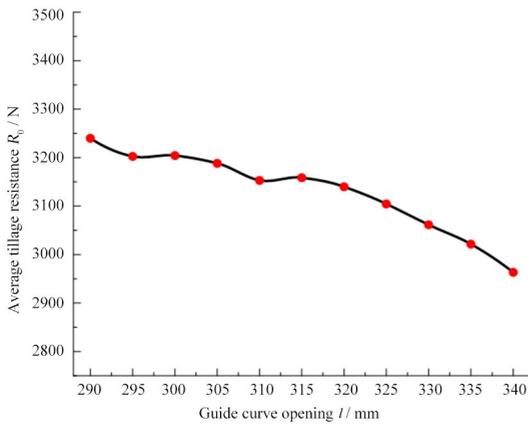


图 16 导曲线开度  $l$  对平均耕作阻力的影响

Fig. 16 Influence of lead curve opening  $l$  on average tillage resistance

由图 16 可知,随着导曲线开度  $l$  的增大,平均耕作阻力逐渐下降,耕作阻力出现这种变化的原因是:随着导曲线开度  $l$  的增大,犁体曲面的弯曲程度有所下降,耕作阻力也随之下降.虽然较大的导曲线开度有利于减小耕作阻力,但过大的导曲线开度不仅会使得土垡翻转程度降低,导致底层土壤无法被翻至地表,还会使得土垡破碎程度降低,降低作业质量.因此在设计导曲线开度时,应该在满足犁体曲面翻垡、碎土性能的前提下,尽可能选择较大的导曲线开度.

### 3.3 犁铧安装角 $\epsilon$ 对耕作阻力的影响分析

基于前述水平直线法建立以犁铧安装角  $\epsilon=20^\circ$  为起点,变化增量为  $1^\circ$ ,变化范围为  $20^\circ\sim 30^\circ$  的系列高速犁体曲面,并进行耕速为  $2\text{m/s}$ ,耕深为

$200\text{mm}$  的犁耕作业仿真试验,得到犁体曲面平均耕作阻力  $R_0$ .随犁铧安装角  $\epsilon$  的变化情况如图 17 所示.

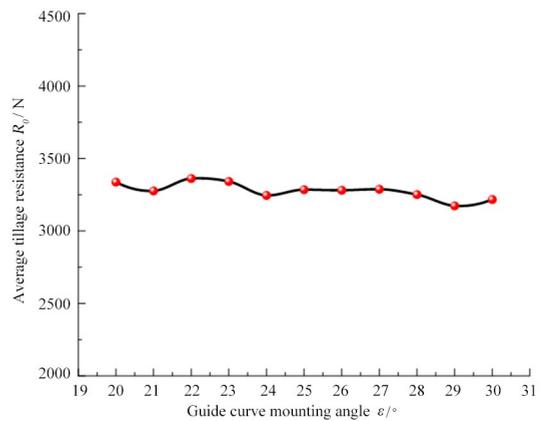


图 17 犁铧安装角  $\epsilon$  对平均耕作阻力的影响

Fig. 17 Influence of plow share installation angle  $\epsilon$  on average tillage resistance

由图 17 可知,随着犁铧安装角  $\epsilon$  的增大,平均耕作阻力变化不大,当安装角  $\epsilon$  在  $20^\circ\sim 21^\circ$ 、 $22^\circ\sim 24^\circ$ 、 $27^\circ\sim 29^\circ$  范围时,平均耕作阻力呈现小幅度下降,安装角  $\epsilon$  在  $21^\circ\sim 22^\circ$ 、 $25^\circ\sim 27^\circ$ 、 $29^\circ\sim 30^\circ$  范围时,平均耕作阻力呈现小幅度上升.耕作阻力出现这种变化的原因是:随着犁铧安装角的增大,犁体曲面的扭转程度变大,对土垡的扭转效果较好,能防止土垡扭转后回垡掩盖犁沟,但扭转土垡对耕作阻力的影响不大,所以犁铧安装角变化,耕作阻力变化不大.因此在设计犁铧安装角时,应尽可能选择较大的犁铧安装角.

### 3.4 高度偏差量 $\Delta H$ 对耕作阻力的影响分析

基于前述水平直线法建立以犁体曲面高度偏差量  $\Delta H=30\text{mm}$  为起点,变化增量为  $5\text{mm}$ ,变化范围为  $30\text{mm}\sim 80\text{mm}$  的系列高速犁体曲面,并进行耕速为  $2\text{m/s}$ ,耕深为  $200\text{mm}$  的犁耕作业仿真试验,得到平均耕作阻力  $R_0$ .随高度偏差量  $\Delta H$  的变化情况如图 18 所示.

由图 18 可知,随着高度偏差量  $\Delta H$  的增加,平均耕作阻力整体呈现上升趋势,当  $\Delta H$  在  $30\text{mm}$  至  $45\text{mm}$  内变化时,平均耕作阻力的上升幅度最大,当  $\Delta H$  在  $50\text{mm}$  至  $65\text{mm}$  内变化时,平均耕作阻力上升幅度最小,其中当  $\Delta H$  在  $45\text{mm}$  至  $50\text{mm}$ 、 $65\text{mm}$  至  $70\text{mm}$ 、 $75\text{mm}$  至  $80\text{mm}$  内变化时,平均耕作阻力均有不同程度的下降.耕作阻力出现这种变化的原因是:随着高度偏差量的增大,

犁体曲面整体高度增大,对土垡的翻转、抛撒性能增强,耕作阻力也随之增大.虽然高度偏差量的增大减小会使得耕作阻力减小,但过小的偏差量会使犁体曲面顶边线过低,导致犁体曲面在犁耕作业过程中土垡越过顶边线,降低犁体曲面的翻垡性能,因此,在设计犁体曲面高度偏差量时,在满足一定的翻垡性能的前提下,应尽可能选择较小的高度偏差量.

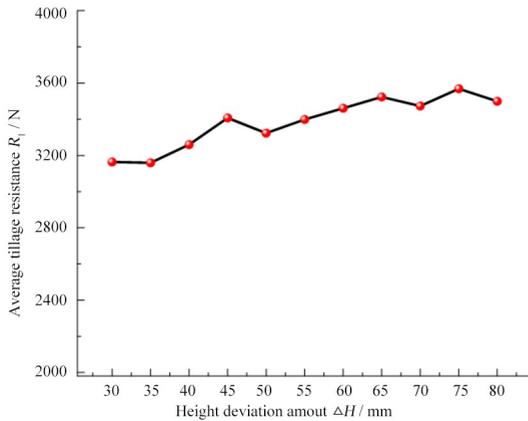


图18 高度偏差量 $\Delta H$ 对平均耕作阻力的影响

Fig. 18 Influence of height deviation  $\Delta H$  on average tillage resistance

## 4 结论

(1)分析了水平直线法犁体曲面的形成过程,得出对高速犁体曲面作业性能影响较大的结构参数为铧刃角 $\theta$ 、导曲线开度 $l$ 、犁铧安装角 $\epsilon$ 、高度偏差量 $\Delta H$ .

(2)分析了犁耕作业过程中土壤颗粒的接触形式及受力情况,推导了土壤颗粒的接触刚度、接触阻尼和接触力的表达式,并建立了土壤颗粒的运动微分方程;通过在颗粒间添加粘结力模拟了土壤的粘结特性,并推导了粘结力的表达式.基于离散元仿真软件设置合适的接触模型及土壤环境参数对土壤结构进行仿真建模,建立能表征土壤特性的双土层结构,并结合设计的不同参数的高速犁体曲面建立了高速犁体曲面—土壤互作模型.基于智能型土壤—机器—植物系统技术平台搭建了犁体耕作土槽试验平台,对不同工况下的仿真试验进行验证,确保了仿真试验的合理性.

(3)基于搭建的高速犁体曲面—土壤模型,研究了犁体曲面结构参数高度偏差量 $\Delta H$ 、导曲线开度 $l$ 、犁铧安装角 $\epsilon$ 、铧刃角 $\theta$ 对耕作阻力的影响规律.结果表明:在设计犁体曲面铧刃角时,在满足铧

尖强度的前提下,尽可能选择小的铧刃角;在设计导曲线开度时,应该在满足碎土性能的前提下,尽可能选择较大的导曲线开度;在设计犁铧安装角时应选择较大的安装角;在设计犁体曲面高度偏差量时,在满足一定的翻垡性能的前提下,应尽可能选择较小的高度偏差量.

## 参 考 文 献

- [1] 盛剑浩,李振宇.土垡横剖面翻转法形成高速犁体曲面[J].农业机械学报,2000,31(1):38-41.  
SHENG J H, LI Z Y. Design of plow bottom surface by turning over method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2000, 31(1): 38-41. (in Chinese)
- [2] 孙一源.高速犁体曲面设计方法述评[J].镇江农业机械学院学报,1981,2(2):61-73.
- [3] 杨文彩,杨青,邢希东,等.高速犁体曲面优化设计方法之新见解[J].西北农业大学学报,2000,28(5):105-108.  
YANG W C, YANG Q, XING X D, et al. A new method of optimal design for high speed plough surface [J]. The Journal of Northwest Agricultural University, 2000, 28(5): 105-108. (in Chinese)
- [4] 赵永满,王维新.高速犁体曲面的性能分析及主要参数的选择[J].农机化研究,2005,27(3):117-118.
- [5] 何永强,贺俊林,杨作梅.犁体曲面离散元仿真试验与参数优化[J].农机化研究,2019,41(12):189-193+257.  
HE Y Q, HE J L, YANG Z M. Discrete element simulation and parameter optimization of plow surface [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 189-193+257. (in Chinese)
- [6] 吴声昌,罗余才,朱金华.犁体曲面优化设计[J].江苏工学院学报(自然科学版),1983,4(4):37-44.  
WU S C, LUO Y C, ZHU J H. Optimum design of plow bottom moldboard [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 1983, 4(4): 37-44. (in Chinese)
- [7] 张建国.基于数字化土槽系统犁体力学性能的试验研究[D].阿拉尔:塔里木大学,2014.  
ZHANG J G. The plough test reserch of strength

- performance based on digital soilbin system [D]. Ala' er: Tarim University, 2014. (in Chinese)
- [8] ABO-ELNOR M, HAMILTON R, BOYLE J T. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75(1): 61–73.
- [9] 赵永满, 王维新, 刘俊奇. 水平直元线犁体曲面的三维参数化设计 [J]. 农机化研究, 2007, 29(12): 89–91+94.
- ZHAO Y M, WANG W X, LIU J Q. On three-dimensional parametric design of horizontal straight generatrix plough body surface [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(12): 89–91+94. (in Chinese)
- [10] 戴培康, 赵雪彦, 司冰权, 等. 高速犁犁体曲面结构规范化设计及模态分析 [J]. 动力学与控制学报, 2022, 20(6): 10–23.
- DAI P K, ZHAO X Y, SI B Q, et al. High-speed plow body surface structure normalized design and modal analy [J]. Journal of Dynamics and Control, 2022, 20(6): 10–23. (in Chinese)
- [11] 朱琳, 王琪, 张润森. 含摩擦阻尼器非光滑振动系统的建模与数值仿真 [J]. 动力学与控制学报, 2017, 15(2): 172–177.
- ZHU L, WANG Q, ZHANG R S. Modelling and simulation of the non-smooth vibration systems with friction dampers [J]. Journal of Dynamics and Control, 2017, 15(2): 172–177. (in Chinese)
- [12] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62–72.
- ZHENG K, HE J, LI H W, et al. Research on polyline soil-breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62–72. (in Chinese)
- [13] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 60–67.
- LIU J A, WANG X Y, LI H W, et al. Optimization of structural parameters of subsoiler based on soil disturbance and traction resistance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 60–67. (in Chinese)