

郭小锋, 师鹏辉, 乔书杰, 等. 草莓大棚开沟起垄刀具数值模拟与工作参数响应面优化[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(3): 334-342.

GUO Xiaofeng, SHI Penghui, QIAO Shujie, et al. Simulation of furrowing and ridging blade in strawberry greenhouses and optimization of working parameters[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(3): 334-342.

## 草莓大棚开沟起垄刀具数值模拟与工作参数响应面优化

郭小锋<sup>1</sup>, 师鹏辉<sup>1</sup>, 乔书杰<sup>2</sup>, 孙千涛<sup>3</sup>

(1. 中原工学院 机电学院, 郑州 450007; 2. 郑州财经学院 智能工程学院, 郑州 450000;

3. 河南省农业科学院 长垣分院, 河南 长垣 453400)

**摘要:** 草莓种植要求采用高垄栽培, 为了提高开沟质量, 现有开沟刀具一般是将旋耕刀具的刀身部分进行简单加宽处理。由于这种改进缺乏设计依据, 当前的草莓大棚开沟刀具普遍存在作业质量不高和能耗较大的问题。为了进一步提高草莓大棚开沟刀具的性能, 采用 LS-DYNA 软件建立了开沟刀具土壤旋抛数值仿真模型, 并搭建田间实时试验装置, 对仿真模型进行了分析验证。在此基础上, 采用 Box-Behnken 响应面分析方法, 以刀辊扭矩和残留粒子比例为响应值, 建立了刀辊前进速度, 刀轴转速和开沟起垄深度的二次回归模型, 并对其进行优化。优化结果表明: 前进速度  $0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、刀轴转速  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、开沟起垄深度  $300 \text{ mm}$ , 以此参数进行田间试验得到的扭矩为  $27.9 \text{ Nm}$ , 模型优化预测结果与田间试验相比相对误差小于 5%, 验证了优化模型和结果的可靠性。提出的新型的开沟刀具参数化设计方法可为大棚草莓开沟机具的设计优化提供参考。

**关键词:** 草莓大棚; 开沟起垄刀具; 参数化设计; 数值模拟; 试验研究

中图分类号: S222.3

文章编号: 1000-1700(2024)03-0334-09

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Simulation of Furrowing and Ridging Blade in Strawberry Greenhouses and Optimization of the Working Parameters with the Response Surface Method

GUO Xiaofeng<sup>1</sup>, SHI Penghui<sup>1</sup>, QIAO Shujie<sup>2</sup>, SUN Qiantao<sup>3</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China;

2. School of Intelligent Engineering, Zhengzhou College of Finance and Economics, Zhengzhou 450000, China;

3. Changyuan Branch of Henan Academy of Agricultural Sciences, Changyuan Henan 453400, China)

**Abstract:** Strawberry planting requires the use of high ridge cultivation, in order to increase the quality of furrowing and ridging, the existing blades are generally improved by increasing the width of front part of the blade. Due to the lack of design basis for this improvement, the current strawberry greenhouse furrowing and ridging tools generally have problems of low working quality and large energy consumption. In order to study the blade design method which is suitable for furrowing operation in strawberry greenhouse, the numerical simulation model of soil throwing with the furrowing blade was established by using LS-DYNA software, the real-time field test device was set up to analyze and verify the simulation model. On this basis, Box-Behnken response surface analysis method was used to establish the quadratic regression model,

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705545); 河南省科技攻关项目(222102220058, 222102220091, 232102110302)

第一作者: 郭小锋(1983-), 男, 博士, 副教授, 从事机械智能优化设计方法研究, E-mail: mexf@foxmail.com

in which the forward speed of the blade roller, the rotational speed of the blade shaft and the depth of furrowing and ridging are taken as input variables, and the torque of the blade roller, the proportion of residual particles are as the response values. By using the optimization module of the Design-Expert, the result shows that the forward speed of the machine is  $0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the blade shaft speed is  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , and the furrowing and ridging depth is  $300 \text{ mm}$ . To verify the optimization result, the shaft torque obtained from field experiment with the optimized parameters is  $27.9 \text{ Nm}$ , and the relative error is less than  $5\%$ , which verifies the reliability of the optimized model. The new parametric design method of the furrowing and ridging blade in this study can provide reference for the design and optimization of strawberry furrowing machine in greenhouses.

**Key words:** strawberry greenhouse; furrowing and ridging blade; parametric design; numerical simulation; field test

与一般作物相比,草莓种植要求采用高垄栽培<sup>[1-2]</sup>,垄高 $30\sim 50 \text{ cm}$ ,沟底宽度 $30\sim 35 \text{ cm}$ 。传统的草莓开沟常采用通用的旋耕作业刀具,存在作业质量和工作效率不高的问题。现有的旋耕刀具标准主要面向耕地作业,开沟刀具的设计优化需要基于仿真分析和田间试验相结合的方法进行。

当前,关于开沟刀具的设计、仿真和试验研究较少,相关研究可借鉴旋耕刀具。在旋耕刀的设计方面,ZHU等<sup>[3]</sup>利用双偏心圆弧设计了一种挖掘油莎豆的新型旋耕刀具。曲国良等<sup>[4-5]</sup>对旋耕刀的刃口曲线进行了研究,发现采用偏心圆、正弦螺线方法设计旋耕刀侧切刃曲线,可使刀具具有更好的切削性能。

在旋耕刀的数值仿真方面,朱留宪等<sup>[6]</sup>采用有限元方法建立了刀辊切削土壤的数值仿真模型,并对切削力和扭矩进行了仿真分析。杨望等<sup>[7-8]</sup>采用SPH方法建立仿真模型进行动力学仿真试验研究了土壤剪切破坏过程及剪切强度的影响规律和机理。在试验研究方面,方会敏等<sup>[9-10]</sup>采用示踪块装置,将土槽试验和仿真分析进行了对比,揭示了切削土壤的运动规律,验证了仿真模型和方法的可靠性。LI等<sup>[11]</sup>基于仿真模型和土槽试验,得到了单个旋耕刀的扭矩和功耗,并对旋耕工作参数进行了优化。

通过文献检索发现,现有的旋耕刀具试验研究一般采用土槽试验台方案,较难反映刀具田间实际作业状况。针对草莓大棚种植空间狭小的特点,本研究构建了小型土壤-开沟试验测试平台,通过数值仿真和试验相结合的方法,提出了一种适应于开沟作业的显式数值仿真分析模型和开沟刀具的参数化设计方法;在此数值仿真分析模型上,采用响应面方法,研究了前进速度、刀轴转速、开沟起垄深度对挖掘效率以及挖掘扭矩的影响规律,以期开沟刀具的设计和行业标准的制定提供参考。

## 1 开沟刀参数化设计

目前开沟培土刀的设计还是依据旋耕刀的设计标准,但开沟培土与旋耕作业不同,旋耕作业时刀具正转,将土壤切割粉碎,使土壤耕作层的土壤充分搅拌<sup>[12]</sup>;开沟培土作业时则需要刀具反转,对土壤进行切割粉碎的同时还需要将切割粉碎的土壤抛离原来的位置,在刀具经过的地方形成沟槽,被刀具抛离的土壤落在两侧形成堆垄<sup>[13-16]</sup>。为此,本研究基于数值仿真和试验研究,提出了一种新型的开沟刀具参数化设计方法。

### 1.1 侧切刃刃口曲线设计

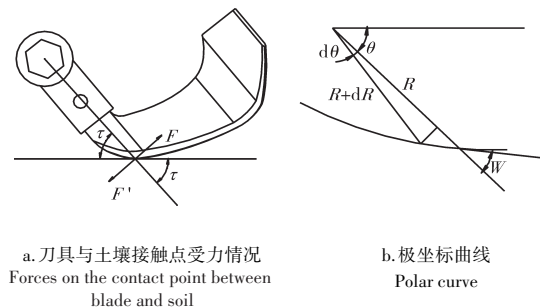
开沟培土刀的外形轮廓如图1a。采用阿基米德螺线对侧切刃刃口曲线进行设计<sup>[17]</sup>,刃口曲线上任一点的滑切角为 $\tau$ ,那么,在极坐标系中,可用极径 $R$ 和极角 $\theta$ 对刃口曲线采用微分方程进行表达,如式(1)。

$$\frac{dR}{R} = -ctg\tau d\theta \quad (1)$$

如果 $t$ 是 $f(\theta)$ 的函数,则:

$$\frac{dR}{R} = -ctgf(\theta) d\theta \quad (2)$$

令 $\tau_n$ 是侧切刃尾部的滑切角,则:



a. 刀具与土壤接触点受力情况  
Forces on the contact point between blade and soil

b. 极坐标曲线  
Polar curve

图1 开沟培土刀的工作情况及极坐标曲线

Figure 1 Working condition and the polar coordinate curve of the blade

$$f(\theta) = \tau_n + K\theta \tag{3}$$

式中:  $K$  为常数, 一般取  $1/18$ 。将式(3)代入式(2)得:

$$\frac{dR}{R} = -\text{ctgf}(\tau_n + K\theta) d\theta \tag{4}$$

令  $\sin(\tau_n + K\theta) = t$ , 则  $K\cos(\tau_n + K\theta) d\theta = dt$ , 将其代入式(4)积分得:

$$R = C\sin^{-k}(\tau_n + K\theta) \tag{5}$$

当  $\theta = 0$  时,  $R = R_n$  则:

$$R = R_n \sin^k \tau_n \sin^{-k}(\tau_n + K\theta) \tag{6}$$

式(6)即为刀具侧切刃刃口曲线的理论设计式。

### 1.2 刀背曲线的设计

正切刃为一斜置平面与圆柱面相贯线<sup>[18]</sup>的一部分。在开沟培土刀的设计中, 刀具宽度对刀具的抛土性能和开沟作业的功率消耗有着非常重要的影响。刀具宽度是由刀背曲线决定的, 为此, 本研究提出采用以下的方法设计刀背曲线。

$$\begin{cases} X = X_0 \\ Y = Y_0 + \Delta Y + a^x - 1 \\ Z = Z_0 \end{cases} \tag{7}$$

式中:  $X_0$  为刀刃曲线的横坐标;  $X$  为刀背曲线的横坐标;  $Y_0$  为刀刃曲线的纵坐标;  $Y$  为刀背曲线的纵坐标;  $\Delta Y$  为刀刃与刀背曲线起点纵坐标之差;  $a$  为扩张函数底数;  $x$  为扩张函数指数;  $Z_0$  为刀刃曲线的竖坐标;  $Z$  为刀背曲线的竖坐标。

由式(7)可知, 刀背曲线与刀刃曲线  $X$  和  $Z$  的坐标相同, 即在  $XOZ$  平面内的投影是重合的, 设计时仅需考虑刀背部分的  $Y$  轴坐标即可。由式(6)和式(7)得:

$$\begin{cases} R = R_n \sin^k \tau_n \sin^{-k}(\tau_n + K\theta) \\ Y_0 = R \sin \theta \\ Y = Y_0 + \Delta Y + a^x - 1 \end{cases} \tag{8}$$

$$Y = [R_n \sin^k \tau_n \sin^{-k}(\tau_n + K\theta)] \sin \theta + \Delta Y + a^x - 1 \tag{9}$$

通过上述方式将输出的刀具刃口部分曲线进行指数扩张得即得到刀背部分的曲线。

### 1.3 开沟刀参数化建模

在图 2a 中, 以坐标原点  $O$  为刀辊的旋转中心对刀具进行设计, 刀柄安装孔的中心为  $O'$ , 刀柄处的顶点  $A, B, I, J$  可参考标准确定。侧切刃和刀柄连接部分  $BC$  段采用平面贝塞尔曲线<sup>[19-20]</sup>进行连接。  $CD$  段为侧切刃曲线, 可采用式(6)进行设计,  $DE$  段为侧切刃和正切刃过渡部分, 可通过空间贝塞尔曲线

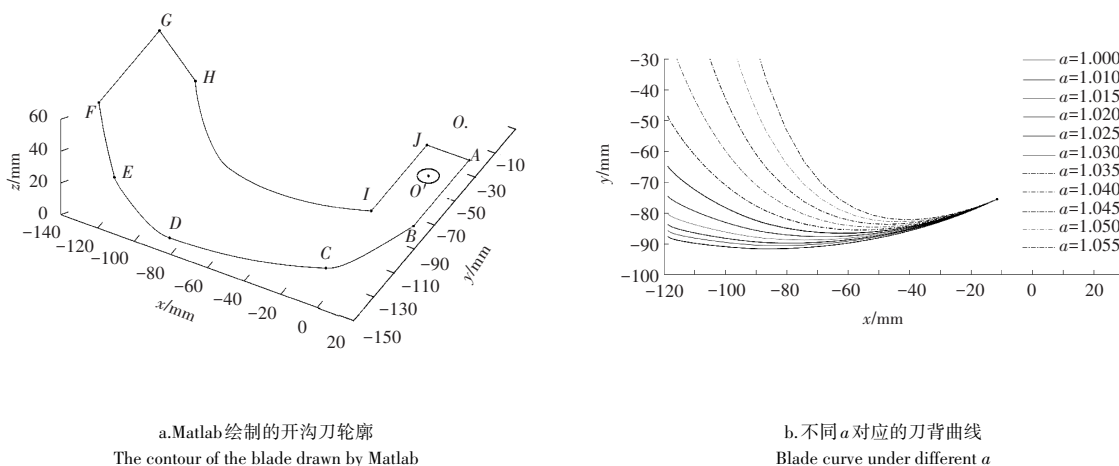


图 2 开沟刀参数化绘制

Figure 2 Parametric modeling of the blade

进行连接。 $IH$ 段为刀背曲线,采用式(9)进行设计。 $F$ 点是正切刃的末端点, $H$ 点是刀背曲线的末端点; $GH$ 平行于 $XOZ$ 平面, $G$ 点的 $X$ 、 $Z$ 坐标与 $F$ 点相同, $Y$ 坐标与 $H$ 点相同。基于以上方法,本研究使用Matlab编写GUI程序用于刀具外部轮廓的精确绘制(图2)。该方法可快速实现开沟刀的参数化建模,为后文优化刀具提供了理论基础。

## 2 基于数值仿真的开沟刀具结构参数设计

### 2.1 仿真模型及试验验证

2.1.1 开沟刀辊有限元模型 开沟培土机开沟部分由刀轴,刀座以及开沟培土刀组成。本研究所用的刀座为错五刀座(5个刀座为一组),同一组刀座的5个刀座不在同一平面内左右相差25 mm,同一平面内的2个刀座之间的夹角为 $144^\circ$ ,不同平面的2个刀座之间的夹角为 $72^\circ$ 。

为了研究仿真试验的可靠性,本研究参考现有文献设计加工的自制开沟刀具的宽度为59 mm<sup>[21]</sup>,以此刀具展开研究。在开沟培土过程中,刀具相对土壤来说硬度大,刀具的变形可以忽略,将刀具设为刚体。刀具的材料为65Mn,刀具的密度为 $7\ 830\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,泊松比为0.3,弹性模量为200。对刀辊划分六面体网格,为了保证计算精度同时兼顾计算效率,刀具的工作接触面采用3 mm的网格,刀具的刀柄等非接触面采用6 mm的网格。

2.1.2 土壤模型 基于SPH方法建立土壤模型,在LS-PrePost中直接生成土壤的粒子模型。土壤的材料使用147-FHWA\_SOIL,土壤密度为 $2\ 350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,体积模量为 $4.65\times 10^8\text{ Pa}$ ,剪切模量 $1.86\times 10^8\text{ Pa}$ ,土壤比重2.79,土壤含水率20.5%(图3a)。

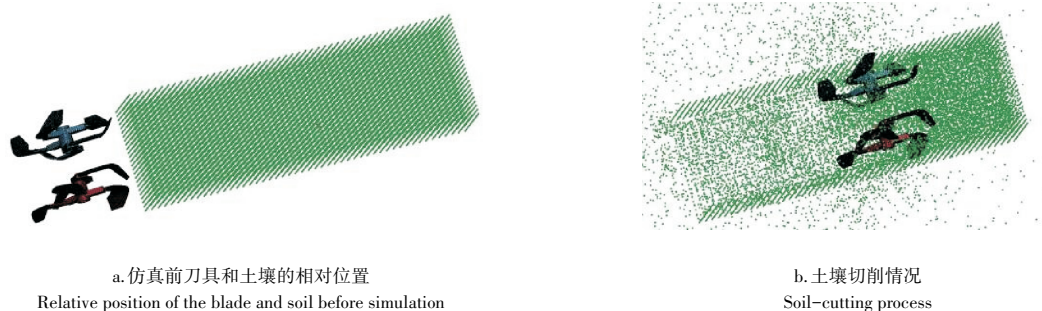
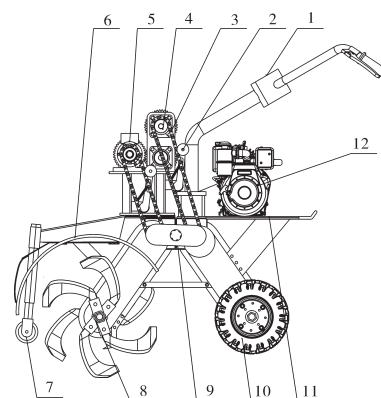


图3 仿真对比图

Figure 3 Comparison of the simulation

2.1.3 仿真参数设置 开沟培土刀绕着 $Z$ 轴旋转的同时,沿着 $X$ 轴的正方向前进,对刀具的自由度进行约束并设置刀具的运动参数,刀具的前进速度设置为 $0.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,刀轴转速为 $5\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ ,仿真时间为2 s。土壤模型长1 100 mm、宽300 mm,高400 mm。土壤是固定的,需要约束土壤的底面以及前后侧面所有自由度使土壤固定。土壤和刀具之间的接触形式为CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_SURFACE。

2.1.4 仿真试验过程 开沟培土过程中,开沟培土刀的刀尖先接触土壤将土壤划开,随着刀轴的转动刀具逐步深入土壤,土壤受到进一步挤压,土壤内部产生相对运动,土壤沿着刀具的刀面产生相对移动,使静止的土壤随着刀具的旋转离开原本的位置,沿着刀面飞到左右两侧。从而在刀



1.操纵扶手;2.张紧轮;3.链条;4.齿轮部分;5.传感器;6.挡土导流板;7.限深轮;8.刀辊;9.变速箱;10.行走轮;11.机架;12.柴油机  
1. Control handrail; 2. Tensioning gear; 3. Chain; 4. Gear parts; 5. Torque sensor; 6. Retaining guide plate; 7. Depth limiting wheel; 8. Blade roller; 9. Gear box; 10. Wheel; 11. Frame; 12. Diesel engine

图4 试验装置机构示意图

Figure 4 Structure diagram of the test device

具经过的地方形成沟,在两侧形成垄,仿真过程如图3b<sup>[22-23]</sup>。

### 2.2 田间试验验证

2.2.1 试验条件 采用动态扭矩传感器(JN-DN3)测量刀轴扭矩以及刀轴转速。为了验证仿真结果的有效性,于2023年9月28日在河南省农业科学院长垣分院进行田间试验,试验装置如图4。此外,试验还用到了奥豪斯水分测定仪(MB27)、卷尺等。

试验时将机器的前进速度设定为 $0.38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,刀轴转速为 $300\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,以刀轴所受到的扭矩为指标与仿真结果对比。土壤破碎效果如图5a,开沟为矩形沟宽度308 mm(图5b),垄顶宽度710 mm(图5c),同时测量开沟起垄深度360 mm(图5d)。

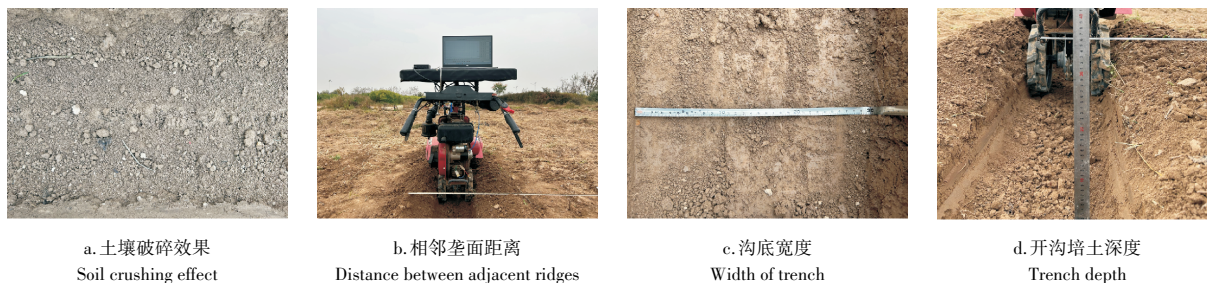


图 5 开沟效果

Figure 5 Furrowing effect

2.2.2 仿真模型验证 通过动态扭矩传感器(JN-DN3)实时采集数据得到图6的扭矩曲线,其中数据采集时间为47 s,实际挖掘时间为29 s,在10~15 s之间扭矩参数有一段突变表示刀具开始进入开沟作业工作状态,当刀具正常开沟作业时,刀辊扭矩围绕40 Nm波动,最大扭矩为45.40 Nm,平均扭矩为37.29 Nm。

根据试验环境和工作参数,采用前文所述的数值仿真分析方法对刀辊土壤切削过程进行分析,仿真时间为20 s,仿真开始后,随着刀具的前进,开沟培土刀与土壤接触,刀具开始正常切割土壤,扭矩不断增大,正常工作时,扭矩在40 Nm上下波动,仿真开沟时最大扭矩为47.05 Nm,平均扭矩为36.31 Nm。刀辊扭矩动态仿真曲线与田间试验结果的对比如图6,通过分析可知,仿真试验的最大扭矩与田间试验相比相差1.65 Nm,平均扭矩相差0.98 Nm。试验采集的扭矩波形和仿真得到的扭矩波形相似,误差小于3%,说明了仿真模型和方法的可靠性。

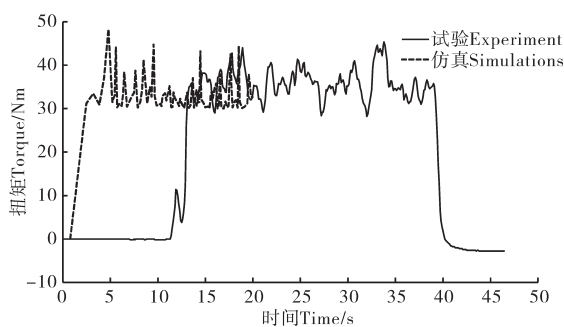


图6 试验与仿真扭矩对比

Figure 6 Torque comparison between simulation and test

### 2.3 开沟刀具结构参数设计

在开沟作业过程中,抛土性能和开沟作业的功率消耗互为矛盾,刀具宽度增加,抛土性能提高,但功耗增加;反之则抛土性能降低,功耗减少。为了研究刀具宽度对功率消耗的影响,进而在机具发动机功率一定的情况下,设计最佳参数的刀具,本研究通过参数化的方法设计了几种不同宽度的刀具,采用前文中的方法对其进行了仿真试验。结果如图2b。

对于旋耕作业刀具,国家标准对其刀宽参数的推荐范围为40~50 mm<sup>[24-25]</sup>,为提高开沟质量,本研究在试验研究中,设计加工的开沟刀具的宽度应大于旋耕刀的宽度。

图2b中 $a < 1.025$ 时对刀刃曲线的扩张不明显,此时得到的刀具宽度小于50 mm。当 $a > 1.035$ 时,刀背曲线的扩张程度急剧增加,使得刀具形状产生畸变。为此,将 $a$ 的取值范围设定为: $1.025 \leq a \leq 1.035$ ,并对不同 $a$ 时,刀具的工况进行数值分析。

图7为 $a$ 分别为1.025,1.030,1.035时刀辊的动态扭矩图。其中, $a = 1.025$ 时,最大扭矩为71.92 Nm,平均扭矩为57.20 Nm; $a = 1.030$ 时,最大扭矩为76.96 Nm,平均扭矩为61.76 Nm; $a = 1.035$ 时,最大扭矩

为85.17 Nm,平均扭矩为69.03 Nm。

对于本研究的试验装置,其工作时的总功率可采用下式进行计算:

$$P = \frac{NT}{9550} + \frac{FV}{1000} \quad (10)$$

式中: $P$ 为总功率(kW); $N$ 为刀轴转速( $r \cdot \min^{-1}$ ); $T$ 为扭矩(Nm); $F$ 为前进阻力(N); $V$ 为前进速度( $m \cdot s^{-1}$ )。

本试验装置中发动机的额定功率 $P=5.1$  kW,额定刀轴转速 $300 r \cdot \min^{-1}$ ,额定前进速度为 $0.72 m \cdot s^{-1}$ ,通过仿真得到田园管理机前进过程中需克服的行进阻力约为3 500 N。

在不同刀背扩展系数 $a$ 下,采用前文的仿真分析方法可得到开沟刀辊对应的扭矩,通过式(10)计算可以得到其对应的功率 $P$ ,由此可得到扩展系数 $a$ 和功率 $P$ 之间的对应关系表1。采用Matlab进行拟合插值,可以得到当试验装置的发动机功率 $P=5.1$  kW时对应的刀背扩展系数 $a$ 为1.034,此时刀具宽度为63 mm。

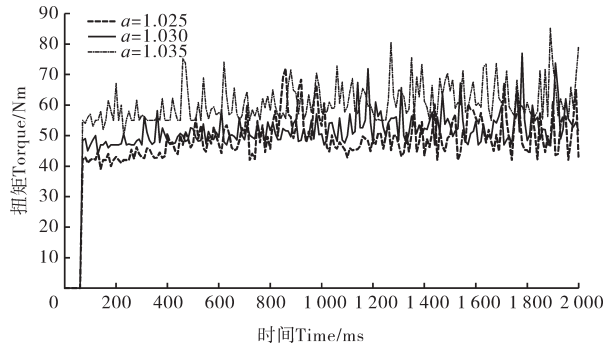


图7  $a=1.025, a=1.030, a=1.035$ 对应的扭矩  
Figure 7 The shaft torque as  $a = 1.025$ ,  $a = 1.030$ ,  $a=1.035$

表1  $a$ - $P$ 对应关系  
Table 1  $a$ - $P$  correspondence

项目 Item	1	2	3	4	5
刀背扩展系数 Blade back expansion factor	1.025 0	1.027 5	1.030 0	1.032 5	1.035 0
功率/kW Power	4.78	4.85	4.94	5.06	5.20

### 3 基于响应面的开沟作业参数设计

#### 3.1 响应面试验

为研究前进速度、刀轴转速、开沟起垄深度对挖掘效率以及挖掘扭矩的影响规律,本研究采用响应面方法,以扭矩和残留粒子比例(挖掘质量)为响应值,设计了三因素三水平试验。其中,挖掘扭矩反映了开沟作业过程中刀具的功耗,残留粒子比例用来反映开沟质量的好坏。残留粒子比例指的是土壤切削仿真试验中,被刀具切割后的土壤部分,相对于初始状态,剩余的粒子数与该部分初始的粒子数的比值。根据试验装置的性能条件,试验参数的取值范围为:前进速度 $0.38 \sim 0.72 m \cdot s^{-1}$ ,刀轴转速 $160 \sim 300 r \cdot \min^{-1}$ ,草莓开沟起垄深度 $300 \sim 400$  mm。

#### 3.2 试验方案

以刀具的前进速度( $A$ )、刀轴转速( $B$ )和开沟起垄深度( $C$ )为试验的3个因素,生成17组参数组合,其中5组重复的参数用来修正试验误差。响应面因素的取值见表2,试验设计方案及试验结果如表3。

表2 响应面试验因素水平

Table 2 The factor level of the response surface methodology

因素 Factor	水平 Level		
	-1	0	1
$A/(m \cdot s^{-1})$	0.38	0.55	0.72
$B/(r \cdot \min^{-1})$	160	230	300
$C/mm$	300	350	400

#### 3.3 试验结果与分析

3.3.1 回归模型的建立与检验 通过LS-DYNA仿真分析得到不同试验条件下的工作扭矩,采用逐步回归法,得到开沟刀具工作扭矩、残留粒子比例的回归模型式(11)和式(12),其方差分析结果如表4。

$$T = 42.65 + 8.09A + 4.19B + 6.92C - 0.21AB - 2.08A^2 - 1.4B^2 - 1.73C^2 \quad (11)$$

$$X = 35.64 + 3.36A - 3.84B + 0.77C + 0.62AB + 0.75AC + 0.6BC - 2.29A^2 - 2.84B^2 - 0.7C^2 \quad (12)$$

由表4可知,工作扭矩、残留粒子比例的回归模型显著性概率 $p$ 均小于0.000 1,说明模型显著。模

表3 Box-Behnken设计方案和结果  
Table 3 Experimental design and results of Box-Behnken

序号 No.	输入变量 Input variable			响应值 Response value	
	<i>A</i> /(m·s <sup>-1</sup> )	<i>B</i> /(r·min <sup>-1</sup> )	<i>C</i> /mm	工作扭矩 <i>T</i> /Nm Operating torque	残留粒子比例 <i>X</i> /% Residual particle ratio
1	0.55	230	350	42.76	35.77
2	0.38	160	350	26.68	31.56
3	0.55	230	350	42.36	36.02
4	0.55	300	400	50.51	29.34
5	0.55	230	350	42.59	34.89
6	0.72	230	400	53.96	37.77
7	0.38	230	300	23.72	29.03
8	0.55	160	400	42.36	36.05
9	0.38	300	350	35.69	22.85
10	0.72	300	350	51.24	30.70
11	0.55	300	300	36.68	26.95
12	0.55	230	350	42.78	35.65
13	0.38	230	400	37.56	29.42
14	0.72	160	350	43.08	36.91
15	0.72	230	300	40.12	34.38
16	0.55	160	300	28.52	36.06
17	0.55	230	350	42.76	35.88

型决定系数  $R^2$  分别为0.999 7和0.995 9,说明了回归模型的可靠性。

表4 方差分析  
Table 4 Variance analysis results

方差来源 Sources of variation	工作扭矩 Operating torque					残余粒子 Residual particles				
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean sum of square	<i>F</i>	<i>p</i>	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean sum of square	<i>F</i>	<i>p</i>
模型 Model	1 090.81	7	155.83	4 500.89	<0.000 1	281.91	9	31.32	189.19	<0.000 1
<i>A</i>	524.07	1	524.07	15 136.82	<0.000 1	90.45	1	90.45	546.31	<0.000 1
<i>B</i>	140.11	1	140.11	4 046.93	<0.000 1	118.12	1	118.12	713.41	<0.000 1
<i>C</i>	382.95	1	382.95	11 060.90	<0.000 1	4.74	1	4.74	28.65	0.001 1
<i>AB</i>	0.18	1	0.18	5.22	0.048 2	1.56	1	1.56	9.44	0.018 0
<i>AC</i>	/	/	/	/	/	2.25	1	2.25	13.59	0.007 8
<i>BC</i>	/	/	/	/	/	1.44	1	1.44	8.70	0.021 4
<i>A</i> <sup>2</sup>	18.17	1	18.17	524.88	<0.000 1	22.15	1	22.15	133.77	<0.000 1
<i>B</i> <sup>2</sup>	8.25	1	8.25	238.36	<0.000 1	34.04	1	34.04	205.62	<0.000 1
<i>C</i> <sup>2</sup>	12.64	1	12.64	365.03	<0.000 1	2.05	1	2.05	12.41	0.009 7
失拟项 Lack of fit	0.18	5	0.037	1.14	不显著 Not significant	0.38	3	0.13	0.64	不显著 Not significant

3.3.2 交互因素对试验指标的影响 为了研究各个因素对工作扭矩和残留粒子比例的交互影响,采用 Design-Expert得到各因素对工作扭矩、残留粒子比例影响的响应面如图8和图9。由图8可知,当刀轴转速一定时扭矩随着前进速度的增大而增大。前进速度越大,刀具单次挖掘的土壤体积越多,需要克服的阻力和扭矩也越大。由图9可知,当刀轴转速一定时残留粒子比例随着前进速度的增加而变多。前进速度越大,相同工作距离内刀具圆周运动的次数越少,对土壤粒子的旋抛次数越少,土壤粒子残留就越多。

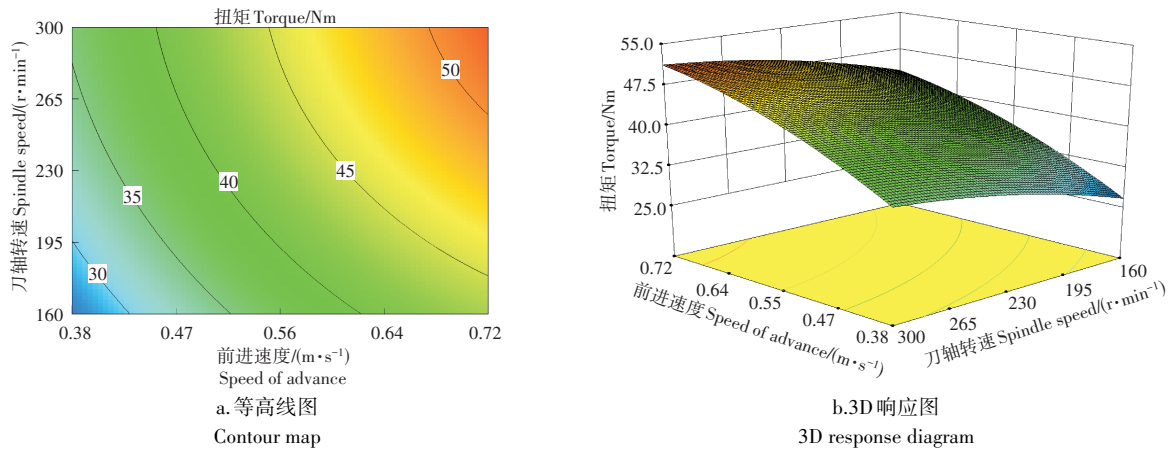


图 8 前进速度和刀轴转速对扭矩的交互作用影响

Figure 8 Interaction effect of forward speed and blade shaft speed on torque

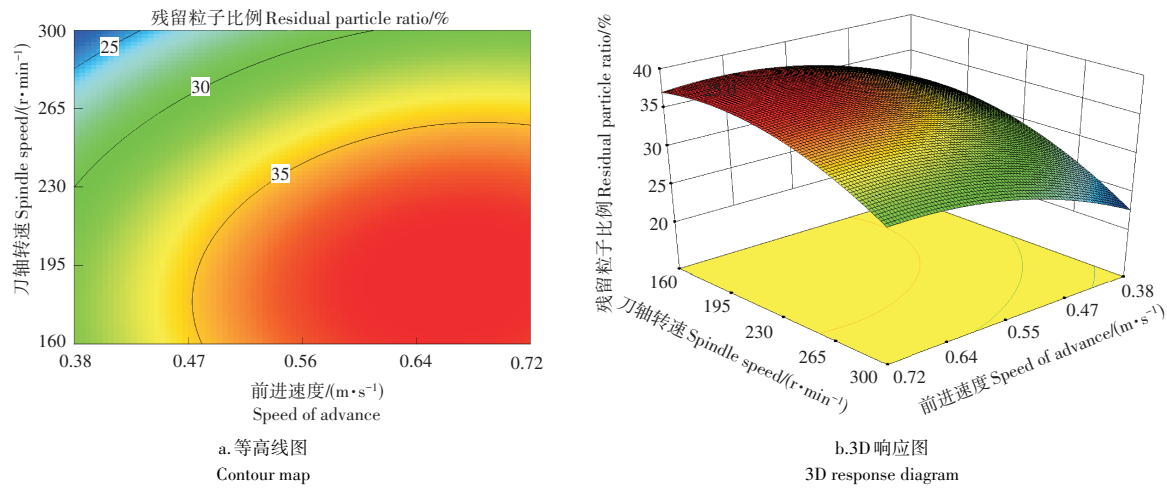


图 9 前进速度和刀轴转速对残留粒子比例的交互作用影响

Figure 9 Interaction effect of forward speed and blade shaft speed on residual particles

3.3.3 参数优化与试验验证 为了获得最优的参数组合,采用Design-Expert软件的优化模块,以工作扭矩消耗最小、残留粒子比例最小为目标,对工作参数进行优化,优化模型为:

$$\begin{cases} \min T \\ \min X \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0.38 \leq A \leq 0.72 \\ 160 \leq B \leq 300 \\ 300 \leq C \leq 400 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

通过分析得到的最优参数组合为:前进速度  $0.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、刀轴转速  $290.25 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、开沟起垄深度  $300 \text{ mm}$ 。此时刀辊的扭矩为  $26.58 \text{ Nm}$ ,切削土壤的残留粒子比例为  $22.80\%$ 。为了验证优化模型和结果的可靠性,同时考虑到试验验证的可行性,将优化后的数据取整为:前进速度  $0.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、刀轴转速  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、开沟起垄深度  $300 \text{ mm}$ 。在河南省农业科学院长垣分院进行了田间试验验证,试验重复 3 次取平均值,得到的实际扭矩为  $27.9 \text{ Nm}$ ,田间试验与优化模型的预测值相对误差不超过  $5\%$ ,说明优化结果具有较高的可靠性。

## 4 讨论与结论

曲国良等<sup>[4-5]</sup>针对旋耕刀的正切刃刃口曲线和侧切刃刃口曲线分别进行了研究,提出了正切刃偏心圆设计法以及 3 种侧切刃刃口曲线,并进行分析论证,得到了最优的侧切刃曲线,既可以满足设计要求,同时也方便加工制造。方会敏等<sup>[9-10]</sup>采用示踪块装置,将土槽试验和仿真分析进行了对比,发现提升刀轴转速,土壤水平和侧向位移都增大,在旋耕刀切土范围内,表层土壤位移最大中层土壤位移

次之,深层土壤位移最小。揭示了切削土壤的运动规律,验证了仿真模型和方法的可靠性。但前者未对刀具完整的刃口曲线进行设计,缺少过渡部分的设计方法;后者采用土槽试验进行验证,未进行田间实际作业试验。

本研究构建了土壤-开沟刀具SPH数值仿真模型,搭建了田间在线试验测试装置,提出以残留粒子比例表征开沟作业质量,通过田间试验和仿真结果的对比,验证了仿真模型的可靠性。以开沟刀具数值仿真分析为基础,从功耗角度提出了一种新型的开沟刀具参数化设计方法。针对当前发动机功率为5.1 kW的试验装置,刀背扩展系数 $a$ 为1.034,刀具宽度为63 mm。构建了刀辊耕作扭矩和作业质量的回归模型,利用Design-Expert软件的优化模块,以工作扭矩消耗最小、残留粒子比例最小为目标,对工作参数进行优化,得到的最优参数组合为:前进速度 $0.38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、刀轴转速 $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、开沟起垄深度300 mm,此时的扭矩为27.9 Nm,田间试验与优化模型的预测值相对误差不超过5%,说明优化结果具有较高的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 刘继展,吴 硕.草莓全程生产机械化技术与装备研究进展[J].农业机械学报,2021,52(5):1-16.
- [2] 陈 彬,陈新华,陈小兵,等.履带自走式草莓旋耕起垄施肥复式作业机设计与试验[J].中国农机化学报,2022,43(1):55-60,85.
- [3] ZHU H,HE X N,SHANG S Q,et al.Evaluation of soil-cutting and plant-crushing performance of rotary blades with double-eccentric circular-edge curve for harvesting cyperus esculentus[J].Agriculture,2022,12(6):862.
- [4] 曲国良,丁为民,彭嵩植.旋耕弯刀侧切刃曲线分析及新型曲线的推导[J].农业机械学报,1991,22(2):22-27.
- [5] 丁为民,彭嵩植.旋耕刀正切刃设计方法的研究[J].农业机械学报,1995,26(4):56-61.
- [6] 朱留宪,孙 勇,王会中,等.基于有限元法的微耕机旋耕刀辊切削土壤仿真[J].农机化研究,2020,42(9):39-43.
- [7] 杨 望,黄 强,李阳铭,等.基于SPH法的粉垄刀具作业性能影响研究[J].农机化研究,2020,42(1):147-152.
- [8] 杨 望,蔡敢为,杨 坚.土壤直剪试验的动力学仿真[J].农业机械学报,2011,42(7):96-101.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] LI X Y,ZHU L X,GONG S.Soil-cutting simulation and dual-objective optimization on tillage process parameters of micro-tiller by smoothed particle galerkin modeling and genetic algorithm[J].Computers and Electronics in Agriculture,2022,198:107021.
- [12] 王瑞丽,潘广鑫,杨 鹏,等.旋耕式秸秆深埋还田开沟机设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2016,47(2):185-191.
- [13] 彭强吉,康建明,荐世春,等.圆盘式开沟机正反转开沟运动学分析及参数优化[J].中国农业大学学报,2018,23(8):151-159.
- [14] 王瑞丽,黄 毅,魏凤兰,等.秸秆深埋还田开沟扶垄犁设计及试验研究[J].沈阳农业大学学报,2011,42(2):231-234.
- [15] 廖庆喜,谢昊明,张青松,等.驱动圆盘犁与双刃型旋耕刀组合式耕整机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(7):99-110,195.
- [16] 赵艳忠,苟金保,王玉峰,等.免耕播种机渐开线侧深施肥开沟器设计与试验[J].东北农业大学学报,2022,53(12):91-100.
- [17] 何晓宁,张学军,赵 壮,等.基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):124-133.
- [18] 姜年朝,陈翠英.基于NURBS理论的旋耕刀曲面造型[J].农业机械学报,2002,33(5):126-128.
- [19] 杨 洋,温 兴,马强龙,等.基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J].农业工程学报,2022,38(6):34-43.
- [20] 刘春香,王金武,唐 汉,等.基于贝塞尔曲线的液肥扎穴机构动力学分析与试验[J].农业机械学报,2016,47(5):115-122.
- [21] 刘大为,谢方平,叶 强,等.1K-50型果园开沟机开沟部件功耗影响因素分析与试验[J].农业工程学报,2019,35(18):19-28.
- [22] 康建明,李树君,杨学军,等.基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真与功耗测试[J].农业机械学报,2017,48(1):57-63.
- [23] ZHAO Z,WANG D W,SHANG S Q,et al.Analysis of cyperus esculentus-soil dynamic behavior during rotary tillage based on discrete element method[J].Agriculture,2023,13(2):358.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.旋耕机械刀和刀座:GB/T 5669-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [25] 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.