

# 基于 Mathematica 的宝塔菜收获机二阶平面铲倾角的优化设计

李金川<sup>1</sup>, 郑毅敏<sup>2</sup>, 尚欣<sup>1</sup>, 慕松<sup>1</sup>, 史鑫鹏<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学机械工程学院, 宁夏银川 750021;

2. 宁夏大学大学生就业创业指导服务中心, 宁夏银川 750021)

**摘要:** 为了进一步提高宝塔菜收获机二阶平面铲的碎土能力, 基于 Mathematica 对宝塔菜收获机二阶平面铲倾角进行了优化设计。设计中建立了二阶平面铲多目标优化模型, 在该模型中, 引入了土壤破碎模型及挖掘铲阻力模型, 借助虚拟倾角的概念, 运用 Mathematica 软件对其进行求解, 得到了一个一阶铲面倾角为 20.44°, 二阶铲面倾角为 43.64°, 一阶铲面高度为 0.12 m, 虚拟铲面倾角为 30.53° 的理论上铲面受力最小、土壤有效剪切力最大的挖掘铲模型, 并从理论角度和软件仿真角度对优化前后二阶铲进行分析对比, 发现优化后的挖掘铲较现有二阶铲的铲面长度、受到的挖掘阻力、最大变形量、所受最大应力及应变均减小, 达到了优化效果。该模型为高碎土能力挖掘铲的设计提供了理论支持和改进方向。

**关键词:** 宝塔菜收获机; 二阶平面铲; 倾角; 多目标优化设计; 应变分析

**中图分类号:** S225.7+9 **文献标志码:** A

## Optimization of the angle of artichoke harvester's second-order flat shovel based on mathematica

LI Jin-chuan<sup>1</sup>, ZHENG Yi-min<sup>2</sup>, SHANG Xin<sup>1</sup>, MU Song<sup>1</sup>, SHI Xin-peng<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Service Center of Career and Employment Guidance, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

**Abstract:** In order to further improve Chinese artichoke harvester's second-order flat shovel, a multi-objective optimization model of second-order flat shovel was established. A soil breaking model and a resistance model of digging shovel were introduced in this model. With the help of the concept of virtual angle and Mathematica, the model was established with the first-order plane angle being 20.44°, the second-order plane angle being 43.64°, the first-order plane height being 0.12 m, and the virtual plane angle being 30.53°. This theoretically digging shovel model had the minimum force and the maximal effective soil shear. Comparison and analysis of the two second-order shovel from the perspective of theory and software simulation were made. The results showed that the shovel length, digging resistance, the maximum deformation, and stain of optimized digging shovel were decreasing, which indicated this optimal design was satisfactory. This optimal model provided a theoretical support and enlightenment for the design of digging shovel with high soil-breaking ability.

**Keywords:** artichoke harvester; second order flat shovel; angle; multi-objective optimal design; strain analysis

宝塔菜属唇形科多年生宿根植物, 地下根茎呈现螺旋状塔形。其肉质脆嫩, 易与土壤粘连, 在机械收获过程中, 很容易损伤果实表皮。在宝塔菜收获过程中, 挖掘铲的结构型式和几何参数对挖掘阻力

的大小影响很大。目前国内外设计的固定式挖掘铲, 按照铲面形状分为三角平面铲、二阶平面铲、曲面铲、栅条铲等<sup>[1-2]</sup>。

目前国内外对宝塔菜收获机的研究很少, 市场

收稿日期: 2015-12-26

基金项目: 宁夏回族自治区科技支撑计划项目“宝塔菜联合收获机的研制”(413-0224)

作者简介: 李金川(1992—), 男, 山东夏津人, 硕士研究生, 主要研究方向为智能农业装备。E-mail: ljcnxu@163.com。

通信作者: 郑毅敏(1964—), 男, 浙江黄岩人, 教授, 主要从事农业机械化研究。E-mail: XJKZym@nXu.edu.cn。

上暂无投入生产的收获机械,而其他根茎类作物(如马铃薯、花生等)收获机的挖掘铲大多数为三角平面铲,出土量多时易产生大土块,发生壅土现象,从而使机具动力消耗急剧增大。而基于宝塔菜自身特点,三角平面铲达不到充分碎土的效果。曲面铲虽然有较好的碎土能力,但造价较高,设计过程较为繁琐<sup>[3]</sup>。栅条铲适用于大型根茎类作物收获<sup>[4]</sup>。而二阶平面铲在三角平面铲的基础上增加了一个倾角,使土壤发生二次剪切,提高了碎土能力;在制造成本方面,二阶铲采用压力加工,折弯模的制造成本比用于制造曲面铲的模具成本低。

综合考虑入土性能、碎土能力及制造成本等方面因素,在宝塔菜联合收获机的设计中,挖掘铲选用了二阶平面铲,该二阶铲是在倾角为 $30^\circ$ 的平面铲上增加了一个较小的倾角平面,在样机试验过程中,挖掘铲的碎土性能并未得到明显改善。

为了进一步提高二阶平面铲的碎土能力,本文引入土壤破碎模型及挖掘铲力学模型,建立了多目标函数,对二阶平面铲的一阶倾角、二阶倾角和一阶倾角高度进行了优化设计,并将优化结果与现有二阶平面铲的结构进行了分析对比。设计过程中,直接对二阶平面铲倾角进行优化设计难度较大,因此借助了平面铲虚拟倾角的概念<sup>[5]</sup>。

## 1 引入力学模型

### 1.1 土壤破碎模型

以虚拟倾角为 $\delta$ 的三角平面铲为研究对象,参考已有的土壤破碎模型<sup>[6]</sup>,即

$$\begin{aligned} T' &= Q - T \\ T &= \tau b(H - h')/\sin\beta \\ Q &= \frac{1}{2}Lh'bg \\ h' &= \frac{L\sin\delta\sin(\frac{\pi}{2} - \delta - \varphi)}{\cos\varphi} \end{aligned}$$

式中, $T'$ 为有效剪切力(N); $T$ 为剪力(N); $b$ 为铲面宽度(m); $\tau$ 为剪切面上的剪应力,可用 $\tau = C + \sigma\tan\varphi$ 计算,其中, $C$ 为土壤内聚力因数, $\sigma$ 为正应力, $\varphi$ 为内摩擦角(正应力在这里为0); $H$ 为铲的工作深度(m); $\beta$ 剪切面与水平面的夹角; $Q$ 为压紧力(N); $L$ 为铲的平移距离(m); $h'$ 为挖掘铲行进 $L$ 距离后土壤上升高度; $g$ 为压缩单位体积的土壤作用力( $N \cdot m^{-3}$ ); $\delta$ 为铲面倾角; $\varphi$ 为土壤与铲面的外摩擦角。

### 1.2 挖掘铲力学模型

以三角平面铲为研究对象,参考已有的挖掘铲

—牵引阻力模型<sup>[7]</sup>,即

$$W = \frac{G}{Z} + \frac{CF_1 + B}{Z(\sin\beta + \mu\cos\beta)} + \frac{C_a F_0}{Z(\sin\delta + \mu_1\cos\delta)}$$

其中,力学模型中其他参数公式如下:

$$Z = \frac{\cos\beta - \mu\sin\beta}{\sin\beta + \mu\cos\beta} + \frac{\cos\delta - \mu_1\sin\delta}{\sin\delta + \mu_1\cos\delta}$$

铲面上的土壤重力: $G = \gamma b d_1(L_0 + \frac{L_1 + L_2}{2})g$ ,

土壤剪切面积:  $F_1 = \frac{bd}{\sin\beta}$ ,

土壤沿铲尖伸出的距离:  $L_1 = \frac{d\cos(\delta + \beta)}{\sin\beta}$ ,

土壤厚度:  $d_1 = \frac{d\sin(\delta + \beta)}{\sin\beta}$ ,

土壤沿铲尾伸出的距离:

$$L_2 = d_1\tan\delta = \frac{d\sin(\delta + \beta)}{\sin\beta}\tan\delta,$$

土壤沿铲面运动的加速力  $B = \frac{\gamma b d v_0^2 \sin\delta}{\sin(\delta + \beta)}$ 。

式中, $\gamma$ 为土壤容重( $kg \cdot m^{-3}$ ); $L_1$ 为土壤沿铲尖伸出的距离(m); $L_2$ 为土壤沿铲尾伸出的距离(m); $L_0$ 为铲面总长度(m); $d_1$ 为土壤厚度(m); $d$ 为挖掘深度(m); $h$ 为铲面高度(m); $v_0$ 为挖掘铲的工作速度。

各参数名称、类型及大小如表1所示。

## 2 二阶铲铲面倾角的优化设计

### 2.1 二阶铲截面形状设计

根据图1中虚拟平面铲铲面倾角、虚拟平面铲铲面长度与一阶铲面倾角、二阶铲面倾角和一阶铲面高度的几何关系,建立数学模型:

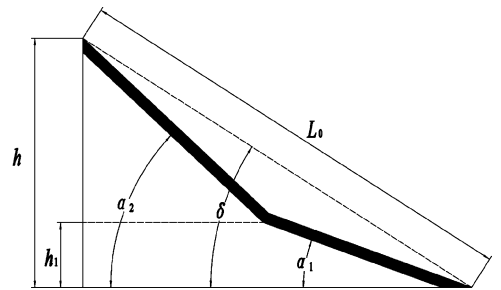


图1 二阶铲截面参数示意图

Fig.1 Diagram of Second-order shovel section

$$L_0 = \sqrt{h^2 + \left[ \frac{h_1}{\tan\alpha_1} + \frac{h - h_1}{\tan\alpha_2} \right]^2} \quad (1)$$

其中,  $L_0 = \frac{h}{\sin\delta}$  (2)

推导出虚拟倾角与一阶铲面倾角、二阶铲面倾角和一阶铲面高度的关系:

表 1 初始计算参数

Table 1 The initial calculating parameters

参数类型 Parameter types	参数符号 Symbols	参数名称 Parameters	参数大小 Reference value	单位 Units
土壤参数 Soil values	$\gamma$	土壤容重 Soil bulk density	1550	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
	$C$	土壤内聚力因数 Soil cohesion factor	15000	$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$
	$C_a$	土壤附着力因数 Soil adhesion factor	15306	$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$
	$\mu$	土壤内摩擦因数 Coefficient of soil internal friction	0.49	
	$\mu_1$	土壤与挖掘铲摩擦因数 Coefficient of friction between soil and plane	0.5	
平面铲结构参数 Structural parameters of flat shovel	$\mu_2$	土壤与轮胎摩擦因数 Coefficient of friction between soil and tire	0.1	
	$b$	挖掘铲幅宽 The width of digging plane	0.28	m
	$h$	铲面高度 The height of digging plane	0.3	m
工作参数 Working parameters	$d$	挖掘深度 Digging depth	0.15	m
	$\beta$	前失效面倾角 The obliquity of front failure plane	34	$^\circ$
	$m_J$	拖拉机的最小使用质量 Minimum use quality of tractor	1900	kg
	$v_0$	挖掘铲工作速度 Working speed of plane	0.52	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

$$\delta = \arcsin \frac{h}{\sqrt{h^2 + \left[ \frac{h_1}{\tan \alpha_1} + \frac{h - h_1}{\tan \alpha_2} \right]^2}} \quad (3)$$

式中,  $\delta$  为虚拟铲面倾角;  $\alpha_1$  为一阶曲面铲铲面倾角;  $\alpha_2$  为二阶曲面铲铲面倾角;  $h$  为铲面高度或提升高度,  $h = 0.3 \text{ m}$ ;  $h_1$  为一阶铲面高度;  $L_0$  为虚拟平面铲铲面长度。

## 2.2 虚拟铲面倾角的多目标优化设计

2.2.1 优化数学模型 在工作深度一定的条件下, 对虚拟平面铲进行优化设计, 应选择设计变量为铲面倾角  $\delta$ , 即:

$$X = [x_1] = [\delta]$$

约束条件为:  $g_1(X) = x_1 - \frac{\pi}{3} \leq 0$

选择两个力学模型为目标函数, 即:

(1) 虚拟铲面阻力最小的目标函数:

令  $f_1(X) = F$ , 则有:

$$\min f_1(X) = \frac{G}{Z} + \frac{CF_1 + B}{Z(\sin \beta + \mu \cos \beta)} + \frac{C_a F_0}{Z(\sin \delta + \mu_1 \cos \delta)}$$

(2) 土壤有效剪切力的负数最小的目标函数:

令  $f_2(X) = -T$ , 则有:

$$\min f_2(X) = -[1/2Lh' b q - \tau b(H - h')/\sin \beta]$$

2.2.2 数学模型的求解 采用统一目标法中的线性加权和法进行优化。线性加权和法是将多目标函数构成一个综合目标函数, 把一个要最小化的函数  $F(x)$  规定为有关性质的结合。在算法的运算中, 各

个分目标函数的重要程度不同, 因此需要综合考虑其影响。通常根据多目标优化问题式中各个目标函数的重要程度, 对应地选择一组权系数<sup>[8]</sup>。其多目标优化的评价函数为:

$$\min_{x \in D} F(X) = \min \left\{ \sum_{i=1}^l W_i f_i(X) \right\}$$

式中,  $W_i (i = 1, 2, \dots, l)$  为权系数, 且  $W_i \geq 0$ ;  $f_i(X) (i = 1, 2, \dots, l)$  为分目标函数;  $D$  为约束可行域。

考虑到两目标在整个问题中有同等重要的程度, 我们将各个单目标最优化值得倒数绝对值取作权系数, 即  $W_i = |1/f_i^*| (i = 1, 2, \dots, l)$ , 其中,  $f_i^* = \min_{x \in D} f_i(X) (i = 1, 2, \dots, l)$ 。

运用 Mathematica 软件中 NMinimize 函数(约束最优化中数值非线性全局最优化函数)数值化求解单目标函数的最优值。NMinimize 中有多种优化方法, 包括直接搜索法、差分进化法、模拟退火算法、随机搜索法等。NMinimize 根据问题的类型选择优化方法, 如果有整数变量, 或者如果目标函数的头部不是一个数值函数的话, 则采用差分进化算法, 对于其他非线性类型的问题, 则采用直接搜索法, 但是如果直接搜索法运行不佳的话, 就会切换到差分进化算法<sup>[9]</sup>。

A. 对于分目标  $f_1(X)$  在自变量  $X$  变化范围内进行最优计算, 经 Mathematica 软件计算得自变量  $X_1^* = [x_1^*] = [13.16^\circ]$  时, 分目标函数  $\min_{x \in D} f_1(X)$  最优值为 2310.11 N。设计变量与目标函数 1 之间的关系如图 2。

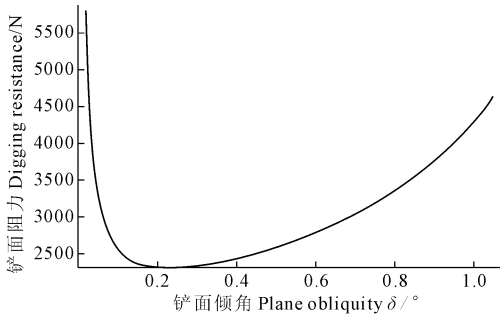


图 2 设计变量与目标函数 1 的关系

Fig.2 Relationship between design variables and objective function 1

B. 对于分目标  $f_2(X)$  在自变量  $X$  变化范围内进行最优计算, 经 Mathematica 软件计算得自变量  $X_2^* = [x_1^*] = [31.75^\circ]$  时, 分目标函数  $\min f_2(X)$  最优值为  $-257.51$ 。设计变量与目标函数 2 之间的关系如图 3。

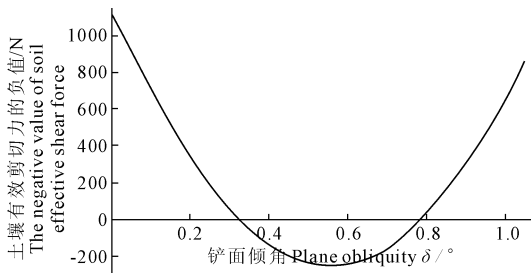


图 3 设计变量与目标函数 2 的关系

Fig.3 Relationship between design variables and objective function 2

所以, 求得权系数:

$$W_1 = |1/f_1^*| = 1/2310.11 = 4.329 \times 10^{-4}$$

$$W_2 = |1/f_2^*| = 1/257.51 = 3.883 \times 10^{-3}$$

则, 多目标优化的评价函数为:

$$\min_{x \in D} F(X) = \min \{ W_1 f_1(X) + W_2 f_2(X) \}$$

再次利用 Mathematica 软件对综合目标函数进行优化计算, 得到自变量的最优值:

$$X = [x_1^*] = [30.53^\circ]$$

设计变量与评价函数之间的关系如图 4。

优化出虚拟倾角为  $30.53^\circ$ , 该角度可作为后续二阶平面铲倾角优化的约束条件。

### 2.3 二阶铲面倾角的多目标优化设计

平面铲的铲面倾角和铲面长度直接影响铲面的碎土性能, 为了能够得到最佳的铲面倾角和铲面长度, 就需要保证在提高碎土性能的前提下对其进行优化设计。

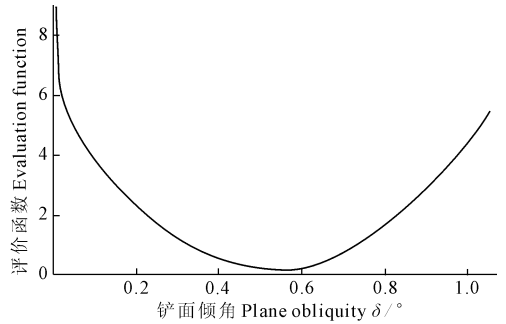


图 4 设计变量与评价函数的关系

Fig.4 Relationship between design variables and evaluation function

引入 2.1 节中的式(1)~式(3), 将虚拟倾角替换成与一阶倾角、二阶倾角、一阶铲面高度相关的表达式, 来完成对铲面倾角的优化设计。

2.3.1 优化数学模型 在工作深度一定的条件下, 对二阶平面铲进行优化设计, 应选择设计变量为一阶铲面倾角  $\alpha_1$ 、二阶铲面倾角  $\alpha_2$  和一阶铲面高度  $h_1$ , 即:

$$X = [x_1, x_2, x_3]^T = [\alpha_1, \alpha_2, h_1]^T$$

根据图 1 可知, 一阶倾角  $\alpha_1$  必须小于虚拟倾角  $\delta$ , 二阶倾角必须大于虚拟倾角  $\delta$ , 一阶铲面高度  $h_1$  必须小于铲面高度(提升高度)  $h$ , 则约束条件为:

$$g_1(X) = x_1 - 30.53^\circ \leq 0$$

$$g_2(X) = x_2 - 30.53^\circ \geq 0$$

$$g_3(X) = x_3 - 0.3 \leq 0$$

目标函数的选择与 2.2 节中虚拟倾角优化设计相同, 即虚拟铲面阻力最小的目标函数、土壤有效剪切力的负数最小的目标函数。

2.3.2 数学模型的求解 选用线性加权和法, 评价函数同第 2 节, 求得权系数后, 再运用 Mathematica 软件中 NMinimize 函数来数值化求解。

A. 对于分目标  $f_1(X)$  在自变量  $X$  变化范围内进行最优计算, 经 Mathematica 软件计算得自变量  $X_1^* = [x_1^*, x_2^*, x_3^*] = [12.25^\circ, 39.00^\circ, 0.27]$  时, 分目标函数  $\min f_1(X)$  最优值为 2310.11 N。

B. 对于分目标  $f_2(X)$  在自变量  $X$  变化范围内进行最优计算, 经 Mathematica 软件计算得自变量  $X_2^* = [x_1^*, x_2^*, x_3^*] = [26.13^\circ, 48.35^\circ, 0.19]$  时, 分目标函数  $\min f_2(X)$  最优值为  $-257.51$ 。

所以, 求得权系数:

$$W_1 = |1/f_1^*| = 1/2310.11 = 4.329 \times 10^{-4}$$

$$W_2 = |1/f_2^*| = 1/257.51 = 3.883 \times 10^{-3}$$

则, 多目标优化的评价函数为:

$$\min_{x \in D} F(X) = \min \{ W_1 f_1(X) + W_2 f_2(X) \}$$

再次利用 Mathematica 软件对综合目标函数进行优化计算,得到自变量的最优值:

$$X = [x_1^*, x_2^*, x_3^*] = [20.44^\circ, 43.64^\circ, 0.12]$$

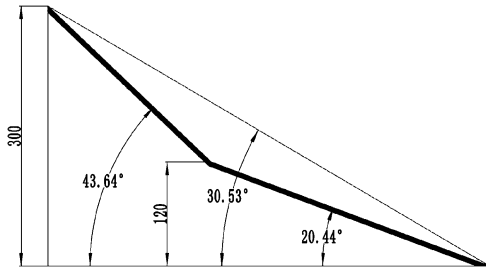


图 5 二阶平面铲截面参数

Fig.5 Sectional parameters of second-order flat shovel

最终优化得到一阶铲面倾角  $\alpha_1 = 20.44^\circ$ , 二阶铲面倾角  $\alpha_2 = 43.64^\circ$ , 一阶铲面高度  $h_1 = 0.12$  m, 虚拟铲面倾角  $\delta = 30.53^\circ$ , 如图 5。

### 3 优化前后对比分析

#### 3.1 优化前后铲面结构对比

由于挖掘深度的要求,改进前后不变的参数为铲面高度(提升高度),均为 300 mm,改进前、后的二阶铲截面几何参数如表 2。

表 2 优化前后二阶铲截面几何参数对比表

Table 2 The comparison of the second-order shovel's sectional geometric parameters before and after optimization

参数名称 Parameter names	参数符号 Symbols	优化前参数大小 Reference value before optimization	优化后参数大小 Reference value after optimization	参数单位 Units
铲面总高度 Total height of the plane	$h$	300	300	mm
铲面总长 Total length of the plane	$L_0$	730	590.58	mm
虚拟铲面倾角 The virtual plane angle	$\delta$	24	30.53	$^\circ$
一阶铲面倾角 The first-order plane angle	$\alpha_1$	5	20.44	$^\circ$
二阶铲面倾角 The second-order plane angle	$\alpha_2$	30	43.64	$^\circ$
一阶铲面高度 The first-order plane height	$h_1$	15	120	mm

表 3 优化前后虚拟铲面受力结果对比

Table 3 The contrastive results of virtual plane stress before and after optimization

铲面形式 Plane type	虚拟倾角 Virtual angle /( $^\circ$ )	铲面面积 Plane area / $m^2$	挖掘阻力 Digging resistance W/N	法向载荷 Normal load $N_0$ /N	摩擦力 Friction $F_f$ /N	附着力 Adhesion $F_a$ /N
优化前 Before optimization	24	0.19	3884	1372	586	2956
优化后 After optimization	30.53	0.08	2652	1685	842	1243

根据对比分析,优化后的挖掘铲较现有铲所受到的挖掘阻力(或机具牵引力)明显减小,达到了优化效果。

#### 3.3 静力学分析

运用 ANSYS 软件对优化前后的挖掘铲进行有

运用 SolidWorks 对优化前后的挖掘铲三维建模,两三维模型对比如图 6。

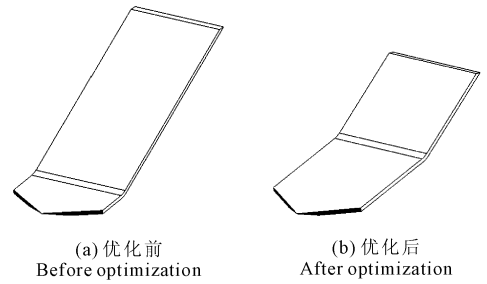


图 6 优化前后三维模型对比

Fig.6 The 3D model contrast before and after optimization

通过优化设计,二阶铲的铲面长度明显减少,铲面虚拟倾角也更接近于根茎类收获机挖掘铲的一般倾角( $30^\circ$ )<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 优化前后虚拟铲面受力结果对比

优化前后,直接改变的参数为铲面倾角,间接改变的参数有铲面面积,在对比优化前后的挖掘阻力、法向载荷及铲面所受摩擦力时,需要改变铲面倾角和铲面面积的大小,根据挖掘铲力学模型来数值求解<sup>[7]</sup>。优化前后虚拟倾角平面铲的铲面受力对比如表 3 所示。

有限元静力学分析。铲面受力包括土壤作用的法向载荷、土壤对挖掘铲作用的摩擦力及因土壤粘性产生的附着力。因为优化前后各个铲面倾角的大小、铲面面积均不同,所以需要根据两参数分别求出各铲面的受力。各铲面受力情况如表 4 所示。

表 4 优化前后各铲面受力情况

Table 4 The condition of plane stress before and after the optimization

铲面形式 Plane type	铲面阶数 Plane order	铲面倾角 Plane obliquity /(°)	铲面面积 Shovel area /m <sup>2</sup>	挖掘阻力 Digging resistance W/N	法向载荷 Normal load N <sub>0</sub> /N	摩擦力 Friction F <sub>f</sub> /N	土壤附着力 Soil adhesion F <sub>a</sub> /N
优化前 Before optimization	一阶 First-order	5.00	0.04	2161	2656	1328	609
	二阶 Second-order	30.00	0.16	3669	1673	836	2435
优化后 After optimization	一阶 First-order	20.44	0.08	2422	1491	745	1284
	二阶 Second-order	43.64	0.07	3106	2178	1089	1126

将三维模型其导入 ANSYS 软件中,单元类型选择 Solid185,弹性模量为  $2.06 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ,泊松比为 0.3,然后进行网格划分、添加边界条件及施加载荷。在宝塔菜收获机中,采用组合铲,每个单铲的两侧固定于机架上,所以边界条件限制两侧面的自由度。载荷按照表 4 的数据施加,法向载荷为压强(Pa),摩擦力和附着力为节点力(N)。添加节点力时,需要将摩擦力和附着力的合力分解到 X、Y 方向上,并通过输入“\* GET, aaa, NODE, 0, COUNT”命令

计算出该面上的节点个数,选择整个面的节点,加载平均节点力。

在输出应力及应变云图时,分别选择“von Mises stress”及“von Mises elastic strain”,von Mises 是一种屈服准则,屈服准则的值通常叫作等效应力,它遵循材料力学第四强度理论(形状改变比能理论)。优化前后的应力及应变云图结果如图 7~8 所示。

优化后的二阶铲受力后的变形量、所受最大应力及应变均减小,分析结果见表 5。

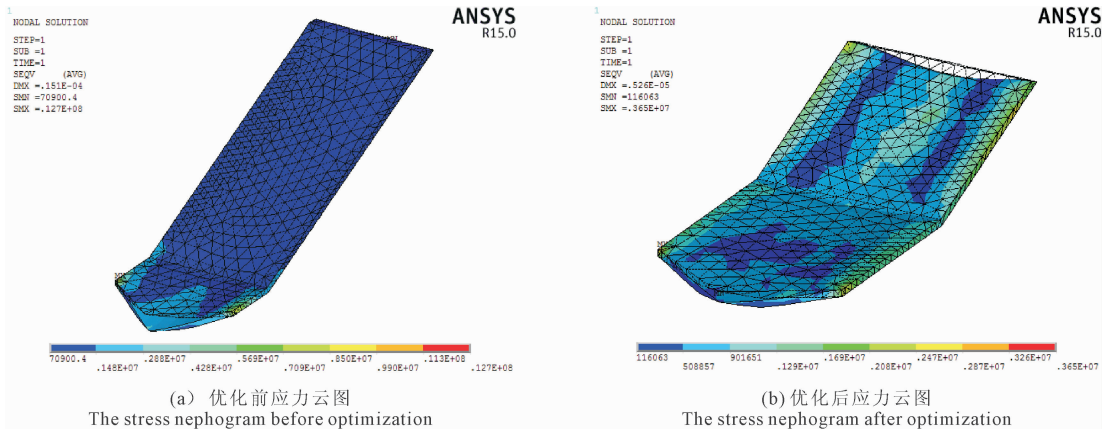


图 7 优化前后铲面应力云图对比

Fig.7 The stress nephogram contrast of two shovels

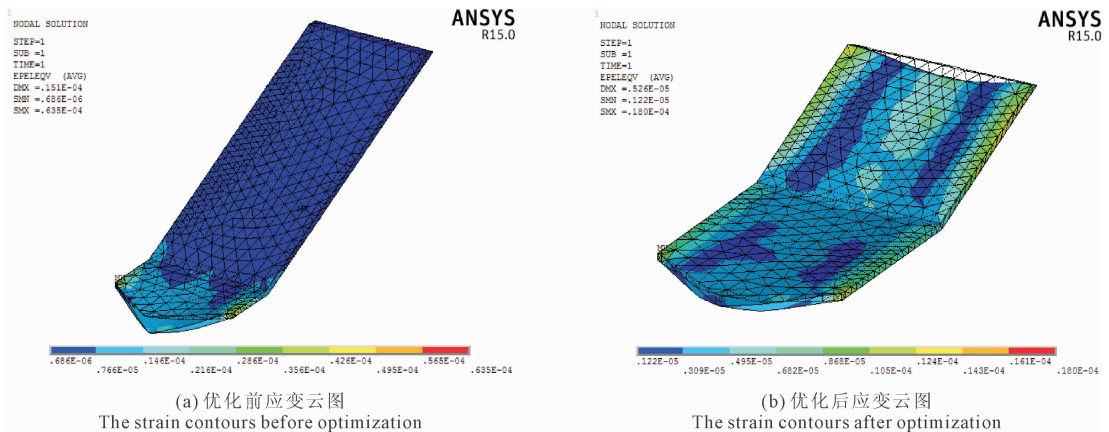


图 8 优化前后铲面应变云图对比

Fig.8 The strain nephogram contrast of two shovels

表 5 有限元分析结果对比

Table 5 The contrastive results of finite element analysis

铲面形式 Plane type	变形分析 Deformation analysis		应力分析 Stress analysis		应变分析 Strain analysis	
	最大变形量 Maximum deformation/mm	最小变形量 Minimum deformation/mm	最大应力值 Maximum stress/Pa	最小应力值 Minimum stress/Pa	最大应变 Maximum strain	最小应变 Minimum strain
优化前 Before optimization	$1.51 \times 10^{-2}$	0	$1.27 \times 10^7$	$7.09 \times 10^4$	$6.35 \times 10^{-5}$	$6.86 \times 10^{-7}$
优化后 After optimization	$5.26 \times 10^{-3}$	0	$3.56 \times 10^6$	$1.16 \times 10^5$	$1.8 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-6}$

## 4 结 论

1) 通过在二阶平面铲多目标优化模型中引入了土壤破碎模型及挖掘铲阻力模型,借助虚拟倾角的概念,运用 Mathematica 软件对其进行求解得到了一个一阶铲面倾角为  $20.44^\circ$ ,二阶铲面倾角为  $43.64^\circ$ ,一阶铲面高度为 0.12 m,虚拟铲面倾角为  $30.53^\circ$  的理论上铲面受力最小、土壤有效剪切力最大的挖掘铲模型。

2) 从理论角度和软件仿真角度对优化前后二阶铲进行了分析对比,发现优化后的挖掘铲较现有二阶铲的铲面长度、受到的挖掘阻力、最大变形量、所受最大应力及应变均减小,达到了优化效果。该模型为高碎土能力挖掘铲的设计提供了理论支持和改进方向。

### 参 考 文 献:

[1] 杨然兵,李国莹,尚书旗,等.机械化挖掘收获部件发展现状与

展望[J].农机化研究,2008,(9):5-9.

[2] 胡志超,彭宝良,尹文庆,等.多功能根茎类作物联合收获机设计与实验[J].农业机械学报,2008,39(8):58-61.

[3] 罗彤娥,吴建民,孙伟,等.2种马铃薯挖掘铲的对比分析[J].甘肃农业大学学报,2011,46(3):121-125.

[4] Yang Ranbing, Shang Shuqi. Design and test of multifunctional curved-surface shovel in digging harvest[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, (S2):47-52.

[5] 关意昭,张周强,黄范辉,等.木薯收获机二阶曲面铲的有限元静力学分析[J].农机化研究,2012,(10):42-49.

[6] 吉尔 WR,范德伯奇 GE.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,1983:102-160.

[7] 邓伟刚,孙宏,王春光.马铃薯挖掘铲工作阻力计算与分析[J].农机化研究,2014,(10):71-74.

[8] 孙靖民,梁迎春.机械优化设计[M].北京:机械工业出版社,2006.

[9] 徐安农.科学计算引论:基于 Mathematica 的数值分析[M].北京:机械工业出版社,2010.

[10] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2003.

(上接第 246 页)

葡萄开始萌发生长的日期,东西向比土埋提前 37 d,南北向比土埋提前 35 d。土埋萌发生长迟缓。

双层覆膜的葡萄都较土埋高产优质,生长旺盛,东西向还要好于南北向。

### 参 考 文 献:

[1] 李银芳,潘伯荣,阿迪力·吾彼尔.天山北坡降雪对葡萄越冬不同覆膜效果的影响[J].干旱区资源与环境,2015,(5):132-137.

[2] 刘永朝.篱式果园最佳行向探讨[J].山东农业大学学报,2008,39(3):393-397.

[3] 刘权,马宝焜,曲泽洲.果树试验设计与统计[M].北京:中国林业出版社,1992:81.

[4] 贺普超.葡萄学[M].北京:中国农业出版社,2001.

[5] 郭锐.西北戈壁条件下葡萄越冬保护技术研究初报[J].甘肃

农业科技,2008,(12):11-13.

[6] 李银芳.利用简易设施防止果树冻害的栽培模式[J].北方园艺,2010,(1):92-94.

[7] Skene KGM, Kerridge GH. Effect of root temperature on cytokinin activity in root exudate of vltis vinifera L[J]. Plant Physiol, 1967,42(1):131-139.

[8] 李银芳.寒冷地区双层覆盖式果树越冬技术[J].北方园艺,2008,(12):17-20.

[9] 孙伟龙,刘震.覆膜对高寒山地酿造葡萄生长发育及产量质量的影响[J].河北林业科技,2012,(2):8-9.

[10] 张学文,张家宝.新疆气象手册[M].北京:气象出版社,2006:181-213.

[11] 张振文,陈武.终霜冻对新疆疆地区酿酒葡萄冻害和产量的影响[J].西北农业学报,2011,20(9):123-128.

[12] 上海师范大学数学系概率统计教研组.回归分析及试验设计[M].上海:上海教育出版社,1978.