

# 保护性耕作双翼对称旋切式浅松刀设计与试验

王庆杰<sup>1</sup> 牛琪<sup>1</sup> 葛士林<sup>1</sup> 杜瑞成<sup>2</sup> 李洪文<sup>1</sup> 张想<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

**摘要:** 在保护性耕作条件下, 为了实现大量秸秆覆盖下表层土壤的松整和除草, 减少土壤扰动量, 设计了一种具有砍切和滑切功能的双翼对称旋切式浅松刀。通过理论分析确定了浅松刀的刀口曲线和结构参数, 利用 SolidWorks 和 Abaqus 软件进行了有限元静力分析和模态分析, 设计的浅松刀结构满足强度要求, 不会发生共振现象。玉米收获后进行了旋切式浅松刀与传统旋耕刀、浅松铲的田间对比试验, 结果表明: 在玉米秸秆全量粉碎还田条件下, 旋切式浅松刀在机具通过性和碎土、除草效果上优于浅松铲, 在作业后的地表平整度与秸秆覆盖情况下优于旋耕刀, 其中旋切式浅松刀的碎土率为 92.2%, 地表平整度为 0.6 cm, 除草率为 97.3%, 作业后地表秸秆覆盖率为 39.5%, 满足保护性耕作条件下的浅松作业要求。

**关键词:** 保护性耕作; 双翼对称; 旋切式; 浅松刀; 秸秆覆盖

**中图分类号:** S222.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0103-05

## Design and Experiment of Double-vane Symmetrical Rotary Blade for Surface Tillage

Wang Qingjie<sup>1</sup> Niu Qi<sup>1</sup> Ge Shilin<sup>1</sup> Du Ruicheng<sup>2</sup> Li Hongwen<sup>1</sup> Zhang Xiang<sup>1</sup>

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

2. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** Surface tillage technology could weed and eliminate the soil harden and wheel ruts, but it is difficult to avoid straw blocking for current surface tillage machine. In order to achieve surface tillage and weeding with a large number of straw mulching and decrease soil disturbance under the requirements of conservation tillage, a double-vane symmetrical rotary blade with the functions of chopping and sliding cutting was designed. Edge curve and structural parameters of this surface tillage blade were determined by theoretical analysis, and the results from finite element static analysis and modal analysis by using SolidWorks software and Abaqus software, which indicated that the blade's structure could meet the requirements of strength and it won't occur resonance phenomenon. The field comparison experiments among surface tillage blade, rotary blade and topsoil shovel were conducted after corn harvest, and the results showed that the crumbling and weeding ability of double-vane symmetrical rotary blade had an advantage over topsoil shovel and the surface roughness and residue cover rate after working were also better than those of rotary blade. Therefore, the soil-crushing rate of double-vane symmetrical rotary blade was 92.2%, surface roughness was 0.6 cm, weeding rate was 97.3% and residue cover rate after surface tillage was 39.5% on the condition of all remaining on the field, thus this double-vane symmetrical rotary blade could meet the operation requirements of surface tillage under conservation tillage.

**Key words:** conservation tillage; double-vane symmetry; rotary cutting; surface tillage blade; straw mulching

收稿日期: 2016-07-20    修回日期: 2016-08-15

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)

作者简介: 王庆杰(1979—),男,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: wangqingjie@cau.edu.cn

通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械化工程研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

引言

表土浅松作业是保护性耕作条件下播前整地的一项耕作技术<sup>[1]</sup>,它能消除表层土壤板结,破除田间作物根茬,减轻收获、运粮、深松等作业在地表产生的沟辙,提高地表平整度,改善播种机的通过性,同时浅松具有良好的除草效果,可代替播前的一次化学除草,减少化学污染,为作物播种创造良好的条件<sup>[2-3]</sup>。因此,为了提高免耕播种质量,改善作物生长环境,有必要在秸秆覆盖条件下进行浅松作业。

目前,国外的表土作业以圆盘耙<sup>[4]</sup>为主,针对不同土壤使用不同类型的圆盘刀;国内多采用铲式浅松机<sup>[5]</sup>进行表土作业,平铲入土 5 cm 左右,在拖拉机带动下高速向前平移,依靠浅松铲的侧翼刃口将土壤中的根茬、杂草等切断,使土壤、秸秆及杂草等在平铲两翼上部划过,从而起到浅松、除草及平整土地目的,但该种类型的浅松铲,每个浅松铲均需安装竖直式固定铲柄,铲柄安装在机架上,依靠增大行距或铲柄自激的方式防止秸秆堵塞,防堵能力差,因此现有的浅松机一般适用于少量秸秆覆盖条件下农田的松土和除草作业,对全秸秆覆盖或者大量秸秆覆盖地块,铲式浅松机易出现秸秆拥堵现象<sup>[6]</sup>,无法完成作业。

针对上述问题,本文设计一种双翼旋切式浅松刀,以解决大量秸秆覆盖引起的机具堵塞问题。

1 设计原理与结构

1.1 设计原理

表层土壤是种子发芽、扎根、出苗的主环境,而土壤平整度、坚实度及秸秆覆盖等是影响表层土壤环境的主要因素。保护性耕作要求秸秆覆盖地表,取消铧式犁翻耕等耕整地作业,采用免少耕作业<sup>[7]</sup>,因此,秸秆覆盖免耕地浅松作业除了要求浅松机具有较好的松土、除草功能,还应具备以下特点:能够对作物秸秆、根茬进行砍切,具有较好的防堵能力;入土深度浅,土壤扰动小,抛土能力低;结构简单,动力消耗低。

根据以上秸秆覆盖免耕地浅松要求,设计了一种浅松刀具,主要利用双翼对称旋切式浅松刀正切刃的砍切和侧切刃的滑切作用对秸秆及土壤进行防堵疏松。

1.2 结构

浅松刀具(图 1)包括双翼对称旋切式浅松刀、刀座和刀轴。其中浅松刀按照对称螺旋线均布固定在刀轴上,同一切土小区设置 3 把刀片,刀轴通过轴承等安装在机架上;刀座两侧加焊圆弧侧板,侧板边

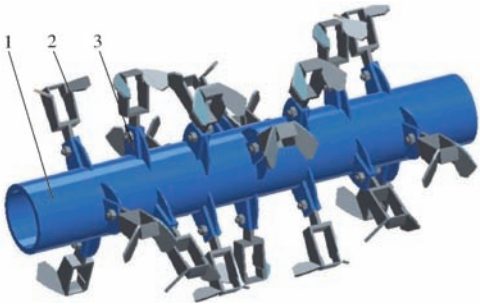


图 1 浅松刀具整体结构示意图

Fig. 1 Sketch diagram of blade assembly for surface tillage

1. 刀轴 2. 浅松刀 3. 刀座

缘为 1 mm 的圆弧刃,可有效避免秸秆缠绕刀轴。

1.3 刀轴转速

浅松刀片铤切土壤时其端点 A 的绝对运动由整机前进运动和刀轴转动时浅松刀绕轴心的回转运动合成。工作时,刀片端点 A 瞬时速度对浅松机工作性能有着极其重要的影响,为了确定刀轴的转速,对刀端点 A 进行运动分析:以刀辊轴心为坐标原点 O,机具前进方向为横坐标 X 轴正向,耕深方向为纵坐标 Y 轴正向。刀端点 A 的运动轨迹如图 2,公式为

$$\begin{cases} x = R\cos\omega t + v_m t \\ y = R\sin\omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中  $v_m$ ——机器前进速度,取 1.5 m/s  
 $R$ ——浅松刀回转半径,mm  
 $\omega$ ——浅松刀旋转角速度,rad/s  
 $t$ ——时间,s

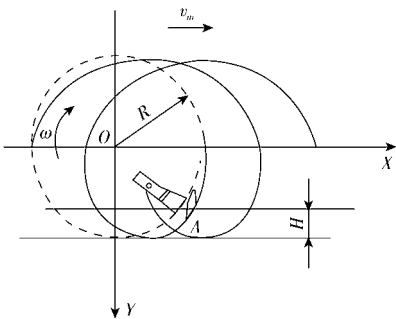


图 2 浅松刀运动轨迹

Fig. 2 Motion trail of surface tillage

将机具前进速度与浅松刀旋转的线速度之比<sup>[8]</sup>定义为浅松速比  $\lambda = R\omega/v_m$ 。当  $\lambda > 1$  时,浅松刀的运动轨迹为余摆线,可保证浅松刀刀片端点运动方向与机具前进方向相反,浅松刀向后切削土壤,以实现秸秆和土壤的防堵疏松。根据设计要求,为尽可能减少浅松刀轴功耗,取  $\lambda = 8$ 。

浅松刀具回转半径  $R$  增大时,所受阻力的扭矩也会随着增大,因此在满足耕作要求的前提下应尽可能减小浅松刀具回转半径。考虑到地表存在大量

秸秆,为有效避免秸秆拥堵,确定  $R$  为 250 mm,故浅松刀刀轴转速计算式为

$$n = \frac{30v_m\lambda}{\pi R} \quad (2)$$

得  $n = 458 \text{ r/min}$ 。

## 2 双翼对称旋切式浅松刀设计

双翼对称旋切式浅松刀的结构如图 3 所示,主要由刀柄、正切部、过渡刃和侧切部组成。两侧切刀对称焊接在刀柄上,底部由过渡刃连接。

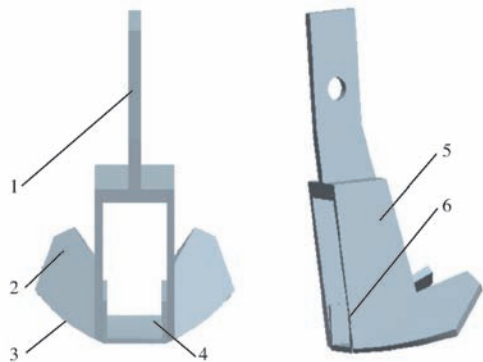


图 3 双翼对称旋切式浅松刀结构图

Fig. 3 Structure diagram of double-vane symmetrical rotary blade

1. 刀柄 2. 侧切部 3. 侧切刃 4. 过渡刃 5. 正切部 6. 正切刃

### 2.1 浅松刀刀口曲线分析

为了保证浅松刀具有较好的切秆、破土及防堵能力,稳定的耕作深度,结合浅松作业浅耕不翻土的要求<sup>[9]</sup>,旋切式浅松刀侧切刃应具有较好的滑切能力,正切刃具有较好的砍切功能,故本文将正切刃设计为直线,侧切刃选取了小段阿基米德螺旋线<sup>[8]</sup>,其方程为

$$\rho = \rho_0 + \kappa\beta \quad (3)$$

式中  $\rho_0$ ——螺旋线起点极径,mm

$\kappa$ ——螺旋线极角每增加单位弧度,极径的增量,mm

$\beta$ ——螺旋线上任意点的极角,rad

为避免无刃部分切土,螺旋线起点的极径计算式为

$$\rho_0 = \sqrt{R^2 + S^2 - 2S\sqrt{2Rd - d^2}} \quad (4)$$

式中  $S$ ——设计切土节距,cm

$d$ ——设计浅松深度,取 5 cm

其中切土节距  $S$  为

$$S = \frac{60v_m}{nz} \quad (5)$$

式中  $z$ ——同一切土小区刀片数,取 3

计算得切土节距  $S$  为 6.5 cm,螺旋线起点的极径为 217 mm。为使侧切刃与正切刃良好过渡,螺旋线终

点极径  $\rho_n$  取 230 mm,故螺旋线终点的极角

$$\beta_n = \frac{\rho_n - \rho_0}{\rho_0} \tan \tau_n \quad (6)$$

式中  $\tau_n$ ——螺旋线终点处的滑切角,50°

计算得  $\beta_n = 0.0673 \text{ rad}$ 。

则  $\kappa = \frac{\rho_n - \rho_0}{\beta_n} = 193.2 \text{ mm}$ ,即有侧切刃的阿基米德曲线为  $\rho = 217 + 193.2\beta, \beta \in (0, 0.0673)$ 。

### 2.2 浅松刀结构参数

#### 2.2.1 弯折角与弯曲半径

以刀轴回转中心为原点  $O$ ,作直角坐标系  $XOY$ ,如图 4 中所示, $AY'$  为弯折线。将浅松刀侧切刃沿弯折线  $Y'$  弯折,侧切面与正切面夹角  $\theta$  即为弯折角。弯折角的大小影响浅松刀作业时刃口所受力以及刀片功耗,当  $\theta$  为 90° 时,浅松刀结构类似于直角刀,弯折角  $\theta$  增大会使得弯曲半径  $r$  增大,工作时浅松刀刀尖先接触土壤,导致浅松刀受力不均、力矩增大,降低刀片使用寿命;当弯折角  $\theta$  过小时,弯曲半径  $r$  会相应变小, $r$  过小会使浅松刀弯曲强度降低<sup>[10]</sup>。因此,弯折角  $\theta$  过大或过小都会降低刀具使用寿命,增加功耗。弯折角  $\theta$  一般为 50°~60°,弯曲半径  $r > 30 \text{ mm}$ <sup>[8]</sup>,根据机具结构及作业要求,本设计取  $\theta$  为 60°, $r$  为 40 mm。

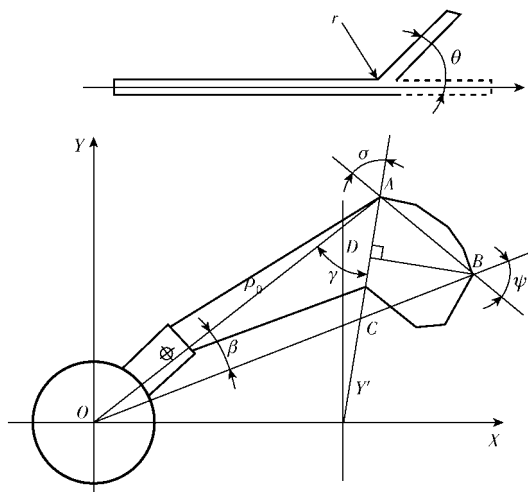


图 4 浅松刀结构参数示意图

Fig. 4 Structural parameters of surface tillage blade

#### 2.2.2 安装角

回转重心  $O$  和侧切刃终点  $A$  连线  $OA$  与弯折线  $AY'$  的夹角  $\gamma$  为弯折线的安装角<sup>[11]</sup>。 $\gamma$  的大小影响侧切面与地表接触位置,当  $\gamma$  过小时,机具作业时,侧切面末端会提前切开未耕土壤,当  $\gamma$  过大时,侧切面不能有效的切刀土壤。本设计中,安装角  $\gamma$  取 50°。

#### 2.2.3 浅松刀切削宽度

浅松刀切削宽度  $L$  与松土效率相关<sup>[12]</sup>,若  $L$  过小,浅松刀松土效率低,为避免漏松现象,需要加大

浅松刀数量,结构复杂;增大  $L$  可减少浅松刀排数,改善松土效果好,但  $L$  过大会使得单刀所受阻力增大<sup>[13]</sup>,在正切面与侧切面弯折处易出现断裂现象。对此本文设计的双翼对称浅松刀切削宽度  $L$  为 126 mm,其中过渡刀宽度为 40 mm,每个侧切刃有效作业宽度为 43 mm。

2.3 浅松刀有限元分析

2.3.1 静力分析

影响浅松刀所荷载荷的因素主要包括机具前进速度、刀具回转速度、浅松深度、土壤含水率与紧实度等<sup>[8]</sup>,根据公式

$$N=0.1K_{\lambda}dv_mB$$

可初步计算浅松刀具功耗  $N$  为 4.725 kW,式中  $K_{\lambda}$  为浅松比阻,取 6.3 N/cm<sup>2</sup>, $B$  为作业幅宽,取 1.5 m。则由公式

$$F=\frac{1\,000N}{2R\omega}$$

可得单把浅松刀所荷载荷  $F$  约为 188 N。考虑到浅松刀初入土时存在冲击载荷,取实际载荷  $F_a=188\times1.5=282\text{ N}$ 。

为保证浅松刀良好的作业性能和较长使用时间,材料选用 65Mn 钢,弹性模量为  $2.11\times10^{11}\text{ N/m}^2$ ,泊松比为 0.29,屈服强度为  $4.3\times10^8\text{ N/m}^2$ ,并利用 ANSYS 软件对浅松刀进行有限元分析:在刀柄安装处施加固定载荷,在正切刃、侧切刃及过渡刃施加冲击载荷  $F_a$  为 282 N,采用标准网格进行划分,浅松刀应力、应变云图如 5 所示。

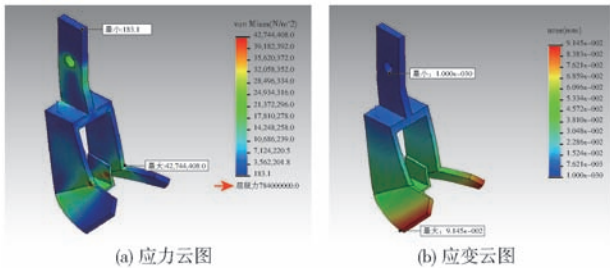


图 5 浅松刀应力、应变云图

Fig. 5 Stress and strain distribution of surface tillage blade

分析计算结果,浅松刀弯折线最上端所受应力最大,为 42.7 MPa,小于材料屈服强度,满足强度要求;最大位移出现在浅松刀刀尖处,位移为  $9.145\times10^{-2}\text{ mm}$ ,最低安全系数为 18.341 6,满足设计要求。

2.3.2 模态分析

浅松刀具作业时因快速旋转会产生一定振动<sup>[14]</sup>,为避免出现整体共振,降低刀具使用寿命,对浅松刀进行部分约束的有限元模态分析,其振动方程为

$$M\ddot{X}+C\dot{X}+KX=F(t) \tag{7}$$

其中  $X=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$   $F(t)=(f_1,f_2,\cdots,f_n)$   
式中  $\ddot{X},\dot{X},X$ ——振动加速度矢量、速度矢量、位移矢量

$M$ ——质量矩阵  $C$ ——阻尼矩阵  
 $K$ ——刚度矩阵

利用 Abaqus 软件对浅松刀三维模型进行模态分析,经网格划分后在浅松刀具安装孔及与刀座固定处施加约束进行求解。得浅松刀前 6 阶约束模态参数分别为 139.8、393.5、421.5、852.9、1 044.8、1 306.6 Hz,而浅松刀具工作转速约为 458 r/min,即激励频率为 7.63 Hz,频率相差大,因此该刀具不会发生共振现象。从 1 阶模态变化对比图(图 6)知浅松刀整体发生弯曲振动,向左偏移,位移变化集中在侧切刃处,即该部分应适当加强刚度。

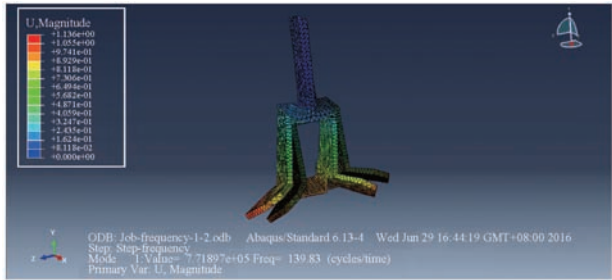


图 6 浅松刀约束模态第 1 阶振型

Fig. 6 First modal type of surface tillage blade

3 田间试验

3.1 试验条件

2015 年 10 月玉米收获后,于河北省涿州市中国农业大学教学试验场进行双翼对称旋切式浅松刀与传统旋耕刀、浅松铲的田间对比试验,各刀具前进速度均为 5 km/h。试验地玉米秸秆经一次粉碎后全量还田,秸秆覆盖率约为 88%,土壤含水率为 16.8%,紧实度为 0.7 MPa,试验面积为 15 hm<sup>2</sup>。

3.2 试验方法

根据文献[15]确定试验方法及试验指标,以考察各浅松部件的碎土、平地、除草效果。

(1)碎土率

随机选取浅松作业行程中 0.5 m×0.5 m 区域内,测定全松层内土块最长边小于 4 cm 的土块质量及土块总质量,计算碎土率。

(2)浅松后地表平整度

插钎法,在田间测试区,随机选取 4 点,每个点利用水平仪拉两根垂直的 1 m 长的水平绳,离地高度 10 cm 左右,沿着水平绳每隔 5 cm 测试一个地面点与绳子的距离。

(3)除草率

在试验地随机选取 5 个测量点,1 m×1 m 为一

个测量单元,测量每个单元里的杂草株数,并对测量点标记注明,杂草被掩埋或翻转被认为除草成功。

(4) 秸秆覆盖率

地表秸秆覆盖率采用拉绳法测量,使用一根长 5 m 的细绳,细绳上每隔 2 cm 作记号,将做有记号的绳子沿着测试区域对角拉直,记录记号点正下方有秸秆点的数量,然后除以总记号数,每种处理重复 6 次,取平均值求得秸秆覆盖率。

3.3 试验结果及分析

表 1 为旋切式浅松刀、旋耕刀及浅松铲的田间对比试验结果,图 7a 为作业前地表秸秆覆盖情况,图 7b、7c、7d 分别为各刀具作业后地表秸秆覆盖情况。

表 1 主要性能指标测试结果

Tab.1 Experimental results of main performance indicators

| 类型     | 碎土率/<br>% | 地表平整<br>度/cm | 除草率/<br>% | 秸秆覆盖<br>率/% |
|--------|-----------|--------------|-----------|-------------|
| 旋切式浅松刀 | 92.2      | 0.6          | 97.3      | 39.5        |
| 旋耕刀    | 94.7      | 1.0          | 98.1      | 22.1        |
| 浅松铲    | 79.4      | 0.7          | 81.8      | 55.1        |

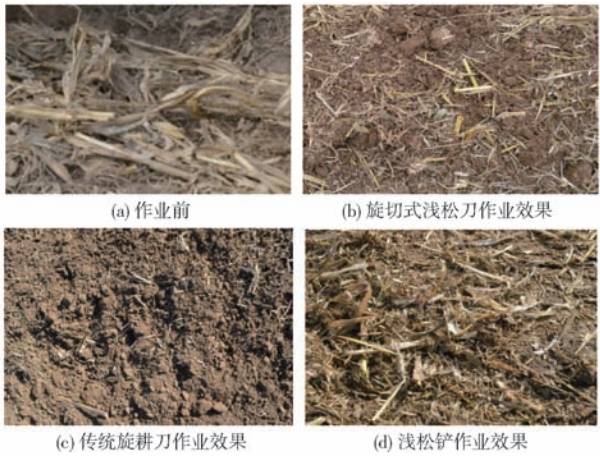


图 7 各刀具作业前后地表秸秆覆盖情况  
Fig.7 Comparison diagram of straw mulching  
before and after operation of different blades

试验过程中,双翼对称旋切式浅松刀、传统旋耕刀在连续工作 500 m 内未出现秸秆堵塞及共振现

象,浅松铲出现两次堵塞,需停机处理,主要原因是试验田秸秆覆盖量较大,部分秸秆未被完全粉碎,浅松铲难以及时清除缠绕秸秆,而旋切式浅松刀与旋耕刀对秸秆、根茬具有一定的切断能力,不易堵塞,通过性较好。

在碎土与杂草去除方面,旋切式浅松刀与传统旋耕刀明显优于浅松铲,主要原因是浅松刀与旋耕刀具有切碎、翻旋能力,而浅松铲只能将铲翼两侧土壤疏松,根系较深的杂草无法去除。

在地表平整度方面,旋切式浅松刀效果最佳,旋耕刀虽碎土效果良好,但加大对土壤的扰动,不利于播前土壤的保温保墒,且秸秆覆盖率较低,难以满足保护性耕作技术要求。浅松铲作业后的秸秆覆盖率虽高于浅松刀,但秸秆覆盖量过大,播种机作业时易出现堵塞、种子架空等现象。综合考虑,旋切式浅松刀在松土、除草、平地等方面更适宜保护性耕作下的浅松作业。

4 结论

(1) 本文设计的双翼对称旋切式浅松刀利用正切刀的砍切与侧切刀的滑切作用实现了表层土壤的切碎,并避免了因秸秆覆盖量大造成的堵塞现象,有效解决了我国旱地保护性耕作下存在的表土板结、平整度差、杂草多等问题。

(2) 通过理论分析确定了旋切式浅松刀的刃口曲线及结构参数,并利用 SolidWorks 和 Abaqus 软件分别对浅松刀进行了有限元静力分析和模态分析,结果表明该结构的浅松刀满足强度要求,不会引起共振现象。

(3) 田间试验表明,在玉米秸秆覆盖率大于 80%、前进速度为 1.5 m/s 时,旋切式浅松刀具的通过性及碎土平地效果优于浅松铲,土壤扰动与秸秆覆盖情况优于旋耕刀,其碎土率为 92.2%,地表平整度约为 0.6 cm,除草率为 97.3%,各项指标均达到保护性耕作条件下的浅松作业技术要求。

参 考 文 献

1 王长生,王遵义,苏成贵,等. 保护性耕作技术的发展现状[J]. 农业机械学报,2004,35(1):167-169.  
WANG Changsheng, WANG Zunyi, SU Chenggui, et al. Development and application of protective farming technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2004,35(1):167-169. (in Chinese)

2 孔德军,高焕文,张永康,等. 保护性耕作条件下浅松作业的试验[J]. 农业机械学报,2006,37(5):48-50.  
KONG Dejun, GAO Huanwen, ZHANG Yongkang, et al. Experimental study on topsoil cultivator under conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(5):48-50. (in Chinese)

3 IVANOV I, DALLEV M. Study of body for surface tillage in medium sandy-clay soils with low humidity[J]. Scientific Papers - Series A, 2015, 58:49-52.

4 BERDOV E I, KHLIZOV N T. The surface tillage disk harrow with a remote control system for angles of attack[J]. Vestnik of Chelyabinsk State Agroengineering Academy, 2014, 67(1):9-13.

23(4): 88 – 93. (in Chinese)

8 赵祚喜, 罗锡文, 李庆, 等. 基于 MEMS 惯性传感器融合的水田激光平地机水平控制系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 119 – 124.  
ZHAO Zuoxi, LUO Xiwen, LI Qing, et al. Leveling controlsystem of laser-controlled land leveler for paddy field basedon MEMS inertial sensor fusion[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 119 – 124. (in Chinese)

9 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 超声波传感器评定水田激光平地机水平控制系统性能[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 73 – 76, 81.  
HU Lian, LUO Xiwen, ZHAO Zuoxi, et al. Evaluation of leveling performance for laser controlled leveling machine in paddy field based on ultrasonic sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 73 – 76, 81. (in Chinese)

10 黎永键, 赵祚喜. 水田激光平地机平地铲姿态测量系统的设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 69 – 75.  
LI Yongjian, ZHAO Zuoxi. Design of attitude measurement system for fat shovel of laser-controlled land leveler for paddy field [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 69 – 75. (in Chinese)

11 陈君梅, 赵祚喜, 陈嘉琪, 等. 水田激光平地机非线性水平控制系统[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 79 – 84.  
CHEN Junmei, ZHAO Zuoxi, CHEN Jiaqi, et al. Design of nonlinear leveling control system for paddy land leveler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 79 – 84. (in Chinese)

12 胡炼, 林潮兴, 罗锡文, 等. 农机具自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 15 – 20.  
HU Lian, LIN Chaoxing, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling control system of agricultural implements [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 15 – 20. (in Chinese)

(上接第 107 页)

5 王兆卫, 李问盈. 小杂粮浅松播种机的设计与试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(3): 1 – 3.  
WANG Zhaowei, LI Wenying. Design and experimental study on surface-tillage planter for small seed crops[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(3): 1 – 3. (in Chinese)

6 孔德军, 王世学, 高焕文. 保护性耕作条件下松耕作业机具的探讨[J]. 农机化研究, 2004(1): 184 – 186.  
KONG Dejun, WANG Shixue, GAO Huanwen. Research on loosening implements under conservative tillage [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(1): 184 – 186. (in Chinese)

7 农业部农业机械化管理司. 中国保护性耕作[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.

8 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

9 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.  
DING Weimin, PENG Songzhi. Research on design of sidelong edge of rotary blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(4): 56 – 61. (in Chinese)

10 唐金涛. 微耕机旋耕弯刀刀型设计及功耗分析方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
TANG Jintao. Study of tiller rotary machete design and power analysis [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)

11 马廷玺, 钟宝瑜. 旋耕刀齿正切面安装角的确定及计算机绘图分析[J]. 北京农业工程大学学报, 1986(1): 13 – 22.

12 胡少兴, 马旭, 马成林, 等. 根茬粉碎还田机除茬刀滚功耗模型的建立[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3): 35 – 38.  
HU Shaoxing, MA Xu, MA Chenglin, et al. A rotary power dissipation model of the machine for chopping and returning stubble into soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(3): 35 – 38. (in Chinese)

13 贾洪雷, 汲文峰, 韩伟峰, 等. 旋耕-碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 45 – 50.  
JIA Honglei, JI Wenfeng, HAN Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 45 – 50. (in Chinese)

14 罗金海, 孙佳民, 杨莉, 等. 9BQS-3.0 型气吹式松土播种复式作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 51 – 55.  
LUO Jinhai, SUN Jiamin, YANG Li, et al. Design and experiment of type 9BQS-3.0 pneumatic scarifying and sowing compound operation machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 51 – 55. (in Chinese)

15 GB/T 24675.1—2009 保护性耕作机械 浅松机[S]. 2009.

16 胡德民. 保护性耕作土壤浅松除草机的设计[J]. 农机化研究, 2009, 31(11): 172 – 174.  
HU Demin. The research of economical farm mechanization producing system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(11): 172 – 174. (in Chinese)