

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.005

固定垄保护性耕作条件下松垄割刀性能对比分析*

蔡国华 何进 李洪文 王庆杰 李慧 卢彩云

(中国农业大学工学院,北京 100083)

【摘要】 在固定垄保护性耕作体系下,针对宽垄沟灌条件下水分渗透难的问题,基于土壤力学接触模型,设计了平刀、缺口刀和V形刀3种松垄割刀。利用ANSYS软件对其进行有限元静力学分析,施加载荷数值来自于纯剪切与两面楔模型对3种割刀受力进行分析计算,得出割刀的应力分布图和变形云图。结果显示,3种割刀设计强度均满足要求,变形较小。结合层次分析法与功效系数法,以割刀理论受力、作业油耗、土壤体积含水率增量为评价指标,确定使用V形松垄割刀作业的综合效益最高。

关键词: 固定垄保护性耕作 松垄割刀 静力学分析 性能对比

中图分类号: S275; S233.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)12-0022-07

Comparative Analysis of Three Ridge-loosing Cutters Based on Permanent Raised Bed Conservation Tillage

Cai Guohua He Jin Li Hongwen Wang Qingjie Li Hui Lu Caiyun

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

Abstract

In view of poor water lateral infiltration into the centers of wide beds under the system of PRB conservation tillage, three structural kinds of cutters including flat cutter, two-edge cutter and V-shaped cutter were designed respectively based on soil mechanics model. To get strength checking and comparative analysis, ANSYS software was adopted to analyze the cutters. The stress of the cutters applied was calculated based on pure-shear and two-wedge models, and got the stress pattern and deformed shape. The results showed that all of these cutters' strength met the demand, and deformed shape was very small. With AHP and effect coefficient methods, and using theoretical resistance, operation fuel consumption and soil moisture as evaluation indexes, V-shaped cutter was found to be the most suitable considering the integrated benefits.

Key words Permanent raised bed conservation tillage, Ridge-loosing cutter, Static analysis, Properties comparison

引言

固定垄(permanent raised bed,简称PRB)保护性耕作是将保护性耕作、固定道和垄作沟灌等技术相结合的一项新技术^[1]。采用固定垄沟灌时,对垄面宽度较大(相邻垄沟中心距不小于1000mm)的固定垄保护性耕作系统,由于灌溉水需要较长时间

由固定垄垄沟水平侧渗到垄面中央,而更多的水分在这段时间内已经垂直入渗到固定垄垄沟和垄边底部,从而造成垄床中央地表以下0~1000mm深度土壤平均含水率低^[2~3]。因而,对于小麦等密行作物的生长,除受边行效应影响外,垄中作物更多的是由于得不到生长所需的足够水分,导致其产量低于垄边作物产量^[4]。此外,由于宽垄渗水能力较差,

收稿日期:2010-01-04 修回日期:2010-05-31

* 国家公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(200903009)

作者简介:蔡国华,博士生,主要从事保护性耕作技术及配套机具研究,E-mail: caiguohua@cau.edu.cn

通讯作者:李洪文,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术研究,E-mail: lihongwen@cau.edu.cn

往往需要增加灌溉量,以使有足够的水分渗透到垄中,造成水分有效利用率偏低^[5]。针对宽垄沟灌中存在的问题,在我国水资源极度匮乏的灌溉农业区进行宽垄沟灌水分增渗技术的研究,解决宽垄沟灌水分侧渗难的问题,提高作物产量,对于节约水资源、促进当地农业生产和固定垄保护性耕作技术的推广都具有重要意义。

鉴于此,本文设计平刀、缺口刀和 V 形刀 3 种割刀用作固定垄松垄作业,并利用 ANSYS 软件对这 3 种割刀强度进行有限元静力学分析校核。通过纯剪切与两面楔模型确定 3 种割刀应施加载荷进行受

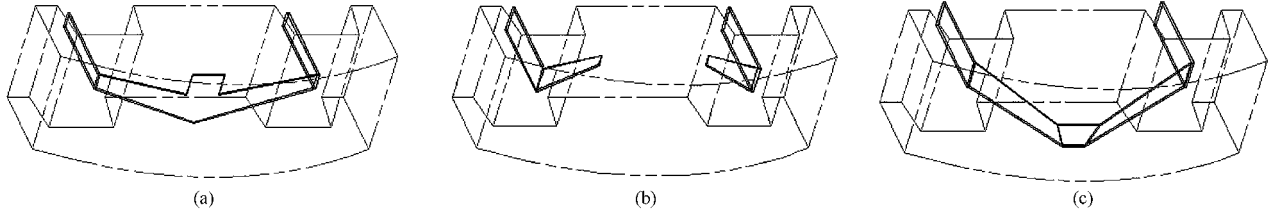


图 1 3 种割刀松垄作业示意图

Fig. 1 Operation sketch of different cutters

(a) 平刀 (b) 缺口刀 (c) V形刀

1.1 土壤力学接触模型

松垄割刀在灌溉之前作业,该地区土质为沙壤土,此时土壤含水率较低,可近似为干颗粒土壤模型^[8]。土壤颗粒之间及土壤颗粒与割刀之间的作用力,应用二维离散元模型,主要表现为切向接触力、法向接触力与摩擦力^[9]。其中,土壤颗粒与割刀之间的相互作用力尤为关键,对割刀是否能够顺利地对土壤进行破碎,即土壤颗粒在刀刃上能否产生滑移有着重大的影响。

土壤颗粒对割刀的法向接触力 N 、切向接触力 S 以及两者之间的摩擦力 F 计算公式为

$$N = k_n x_n + D_n \frac{dx_n}{dt} \quad (1)$$

$$S = k_s x_s + D_s \frac{dx_s}{dt} \quad (2)$$

$$F = N\mu' = \left(k_n x_n + D_n \frac{dx_n}{dt} \right) \mu' \quad (3)$$

式中 k_n, k_s ——土壤颗粒与割刀之间法向、切向刚度系数

x_n, x_s ——土壤颗粒相对割刀法向、切向位移

D_n, D_s ——土壤颗粒与割刀之间法向、切向阻尼系数

μ' ——土壤颗粒与割刀之间摩擦因数

1.2 平刀设计

平刀通过与土壤的滑切作用,在整个垄床底部对固定垄垄床进行线切割。平刀采用双翼形结构,其主要结构参数有:翼张角 2α ,幅宽 B ,刀厚 h ,如

力分析,检验割刀的抗变形与耐磨性能。结合割刀作业油耗和水分增渗效果,利用层次分析法和功效系数法,以综合效益最佳为目标,对割刀进行选型。

1 割刀设计

针对西北河西走廊地区固定垄保护性耕作系统^[6](相邻垄沟中心距 1 000 mm,垄面宽度 650 ~ 700 mm,垄高 150 ~ 200 mm),基于土壤力学模型,结合土壤切割部件的工作特性^[7],参考文献[6]设计了平刀、缺口刀和 V 形刀 3 种割刀。3 种割刀的松垄作业如图 1 所示。

图 2 所示。

幅宽 B 由相邻垄的固定垄中心距确定,设计幅宽 B 为 1 000 mm,以实现对整个垄床底部的有效切割。平刀作业时受力相对较大,为保证割刀强度,确定刀厚 h 为 5 mm。

针对不同类型土壤,平刀设计时应采用不同翼张角 2α 。当拖拉机带动平刀前进时,与平刀刀刃接触的土粒 m 因受到土壤颗粒之间的相互作用力而在刃口上产生与前进方向相反的阻力 R 。根据刃切土壤破碎方式中滑切的原理,当土粒或草根在平刀刃口上产生滑移时,切向力 S 大于土粒与平刀刃口之间的摩擦力 F ,即 $S > F$ 。由 $S = R\cos\alpha, F = N\mu' = R\sin\alpha\tan\varphi$,整理得 $\alpha < 90^\circ - \varphi$, φ 为土粒对刃口的摩擦角,考虑到河西灌区土壤多为沙壤土, φ 取 27° ^[10]。因此,为保证较好的滑切性能, α 要小于 63° ,又当 α 过小时,平刀长度 A 过长,强度不足,易磨损变形。本设计取 $\alpha = 60^\circ$,即平刀翼张角 $2\alpha = 120^\circ$ 。

1.3 缺口刀设计

缺口刀在垄床底部两侧对固定垄垄床进行线切割,实际线切割的长度为平刀的一半。其主要结构参数有:侧偏角 β 、幅宽 B 、刀厚 h ,如图 3 所示。

与平刀设计相同,缺口刀工作幅宽由相邻垄的固定垄中心距确定,设计幅宽 B 为 1 000 mm。为保证水分能渗入到垄床中部的同时,减轻割刀作业的工作阻力,缺口刀实际切割长度为 500 mm。考虑到缺口刀作业时的受力,刀厚 h 确定为 5 mm。

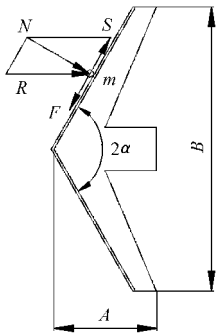


图2 平刀刃口受力简图
Fig. 2 Resistance of flat
cutter's cutting edge

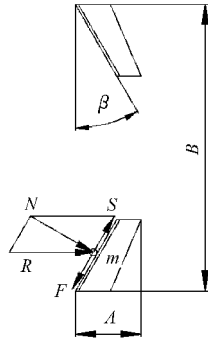


图3 缺口刀刃口受力简图
Fig. 3 Resistane of two-edge
cutter's cutting edge

缺口刀翼张角 β 的设计与平刀相似。缺口刀作业时,与缺口刀刃刀接触的土粒 m 因受到土壤颗粒之间的相互作用力而在刃口上产生与前进方向相反的阻力 R 。同样根据刃切土壤破碎方式中滑切的原理可知,当 $S > F$ 时,土粒在缺口刀刃口上产生滑移,由 $S = R \sin \beta$, $F = N \mu' = R \cos \beta \tan \varphi$,可得 $\varphi < \beta$ 。因此,为了使缺口刀能够获得良好的通过性,翼张角 β 应大于 27° ,又当 β 过大时,缺口刀长度 A 过长,强度不足,易磨损变形。综合考虑机具通过性、刀具强度和土壤特性,确定翼张角 $\beta = 30^\circ$ 。

1.4 V形刀设计

V形刀利用底部水平刀刃与左、右侧刀刃的切割作用,从土层中切离出V形截面的垡条,继而使垡条稍微抬升后移,通过水平刀面与侧刀面,从V形框架中流出,而后回到原位置。其主要结构参数有:侧刃在横向铅垂面内的投影与水平面的夹角 θ 、纵垂面内侧刃投影的后倾角 γ 、水平刀起土角 δ 、幅宽 B 、刀厚 h ,如图4所示。

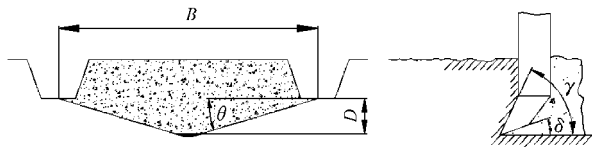


图4 V形刀主要结构参数示意图

Fig. 4 Main structural parameters of V-shaped cutter

在保证V形刀强度的同时,为有效地对整个垄床底部进行切割,设计幅宽 $B = 1\ 000$ mm,刀厚 $h = 5$ mm。侧刃在横向铅垂面内的投影与水平面的夹角 θ 由幅宽 B 和松垄深度 D 来确定。为有效保持松垄作业时垄床的形状及减小V形刀受力,松垄作业不能太深,确定 $D = 150$ mm,由 $\theta = \arctan(2D/B)$,计算出 θ 为 17° 。考虑到侧刀刃后倾时,侧刀刃工作面能够利用土壤抗拉强度低的特点使得土壤产生撕裂破坏而松碎,这样可有效降低工作阻力。若侧刀刃后倾过大(γ 过小),则相同作业深度下,部件长度加大,耗用金属材料增多,使机器变得笨重且割刀易

变形,因此取侧刀刃后倾角 $\gamma = 65^\circ$ ^[11]。为降低V形刀松垄作业时的工作阻力,可适当减小水平刀起土角 δ ,因为 δ 角越小,V形刀从土层中切离出V形截面的垡条抬升越低,机具作业阻力则越小^[11]。但若水平刀起土角 δ 过小,会使刀刃的磨损余量减少,缩短其使用寿命,同时减少了土壤的挤压和抬升量,土壤的松碎效果差,设计时取 $\delta = 25^\circ$ 。

2 割刀有限元静力学分析

松垄割刀在切割垄床的过程中,由于受到土壤阻力作用,会产生一定的应力与变形,因此割刀需具有较强的抗变形与耐磨性能。鉴于有限元分析耕作部件-土壤接触问题的结果要比以往的模型预测更接近于实测值^[12],为验证3种割刀设计的合理性,本文利用ANSYS有限元软件采用准静态模拟^[13]对3种割刀进行有限元静力学分析,校核割刀强度及其模拟工作过程中的变形。

2.1 建立松垄机有限元模型

在建立有限元模型之前,首先需要创建三维实体模型,本文在Pro/E软件中建立3种割刀的三维实体模型。将模型转换为IGES格式,通过ANSYS与IGES之间的接口,将模型导入ANSYS中,再经设置材料属性、定义单元类型和划分网格,生成有限元模型。

单元类型:3种割刀均具有一定厚度,所以选取8节点六面体(Brick 8node 45)单元作为受力的基本单元类型^[14]。

材料与属性:割刀材料采用65Mn钢。鉴于Pro/E导入模型使用毫米单位制^[15],结合65Mn的材料特性,确定输入到ANSYS时材料属性单位分别为弹性模量 2.1×10^5 MPa、泊松比0.3、密度 7.8×10^{-9} t/mm³。65Mn钢的抗拉强度是735 MPa,屈服强度为430 MPa。其中,屈服强度作为应力校核的依据。

网格划分:采用Sweep方式对割刀网格化。其中,平刀沿割刀刃线划分40个区,沿刀刃面划分2个区,生成节点2 598个,单元1 590个;缺口刀刃线划分11个区,沿刀刃面划分2个区,生成节点1 152个,单元660个;V形刀直刀部分沿割刀刃线划分40个区,沿刀刃面划分2个区,两面楔部分按默认Sweep方式划分,生成节点1 786个,单元920个。

2.2 施加约束、载荷并求解

平刀与缺口刀的受力包括切开阻力、刃口法向力 $K_1 F_1$ 和摩擦力 $K_1 F_1 \mu'$ 引起的水平阻力分量,以及切刀侧刃的摩擦力 $K_2 F_2 \mu'$ 。刃口切开阻力很小,可以忽略。又3种割刀设计均采用单侧刃口(图5),

近似认为切刀两侧刃面面积相同、刃口法向力和摩擦力的垂直阻力分量相等, 可以将纯切削模型转换为^[16]

$$P' = 10(K_1 F_1 \sin\sigma + K_1 F_1 \mu' \cos\sigma + 2K_2 F_2 \mu') \quad (4)$$

式中 P' ——纯切削切割阻力, N

σ ——刃角, ($^\circ$)

K_1, K_2 ——土壤变形阻比, kg/cm^2

F_1, F_2 ——刃面和侧刃面面积, cm^2

V 形刀直刀部分受力与平刀和缺口刀类似, 而两面楔部分 (图 6) 采取两面楔切削模型进行割刀受力分析^[17]

$$W' = \frac{G}{z} + \frac{0.1CF' + D}{z(\sin\varepsilon + \mu\cos\varepsilon)} + \frac{0.1C_a F_0}{z(\sin\delta + \mu'\cos\delta)} \quad (5)$$

其中 $z = \frac{\cos\delta - \mu'\sin\delta}{\sin\delta + \mu'\cos\delta} + \frac{\cos\varepsilon - \mu\sin\varepsilon}{\sin\varepsilon + \mu\cos\varepsilon}$

式中 W' ——两面楔牵引力, N

G ——位于两面楔上方的土壤重力, N

z ——常数

C ——土壤内聚力参数, kPa

F' ——土壤剪切面积, cm^2

D ——土壤沿楔面的运动加速度, N

ε ——前失效面倾角, ($^\circ$)

μ ——土壤颗粒之间摩擦因数

C_a ——土壤与金属的附着力参数, kPa

F_0 ——两面楔面积, cm^2

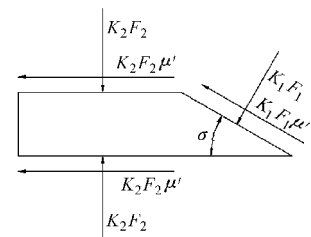


图 5 直刀部分受力简图

Fig. 5 Received force of straight knife

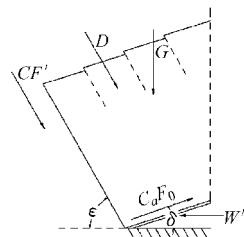


图 6 两面楔部分受力简图

Fig. 6 Received force of two-wedge part

由于松垄割刀主要应用于甘肃河西灌区的固定垄保护性耕作系统, 根据当地土壤特性以及割刀材料 65Mn 特性等因素, 确定式 (4)、(5) 中主要参数如表 1 所示。

表 1 纯剪切与两面楔模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of pure-shear and two-wedge models

参数	数值	参数	数值
$\sigma / (^\circ)$	30	$\lambda / (^\circ)$	25
$K_1 / \text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	7.5	$\varepsilon / (^\circ)$	36
$K_2 / \text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.35	C / kPa	30
μ'	0.5	C_a / kPa	0.2
μ	0.3	z	1.5

应用式 (4)、(5), 并根据两种模型主要参数, 计算出 3 种割刀切割阻力, 如表 2 所示。

表 2 土壤对 3 种割刀的切割阻力

Tab. 2 Cutting resistance from soil to the cutter knife

平刀	缺口刀	V 形刀	
		侧刀部分	两面楔部分
11 960	5 620	10 320	1 413

平刀、缺口刀以及 V 形刀直刀部分牵引阻力均为与割刀前进方向相反的阻力。其中, 刃口法向力和摩擦力的水平阻力分量以节点载荷形式均布在刃面上; 切刀侧刃的摩擦力以节点载荷形式均布在刃线上。V 形刀两面楔部分牵引阻力主要为土壤法向力和摩擦力, 借鉴文献 [14], 分析中只考虑法向力对两面楔的影响, 以压强载荷形式施加于两面楔楔面。

约束均以 ALL DOF 形式施加于 3 种割刀与铲柄的连接处。

运行 Solution-Current LS, 进行静结构有限元分析计算, 分析结果如表 3 所示。

表 3 割刀静力学分析结果

Tab. 3 Static analysis of different cutters

割刀种类	平刀	缺口刀	V 形刀
最大应力/MPa	83.41	38.28	261.49
最小应力/MPa	0.02	0.03	0.97
最大变形/mm	0.175	0.103	2.466

2.3 计算结果分析

根据 3 种割刀应力分布和加载变形 (图 7, 左侧为应力分布图, 右侧为变形云图) 可知, 平刀整体区域的应力特征为压应力, 最大应力为 83.41 MPa, 最小应力为 0.02 MPa, 应力主要分布在割刀两侧边后方; 平刀的最大变形位于平刀中心对称平面处, 为 0.175 mm。缺口刀整体区域的应力特征为压应力, 最大应力为 38.28 MPa, 最小应力为 0.03 MPa, 应力沿缺口刀内侧向外部增加; 缺口刀的最大变形位于缺口刀内侧刀尖处, 为 0.103 mm。V 形刀整体区域的应力特征为压应力, 最大应力为 261.49 MPa, 最小应力为 0.97 MPa, 应力主要分布在割刀两侧边前方; V 形刀的最大变形位于 V 形刀中心对称平面处, 为 2.466 mm。

平刀、缺口刀和 V 形刀的最大应力均小于割刀屈服强度 430 MPa, 割刀强度满足设计要求。其中, V 形刀受力变形最大, 平刀其次, 缺口刀最小; 3 种割刀最大变形位置均位于离割刀中心对称平面最近

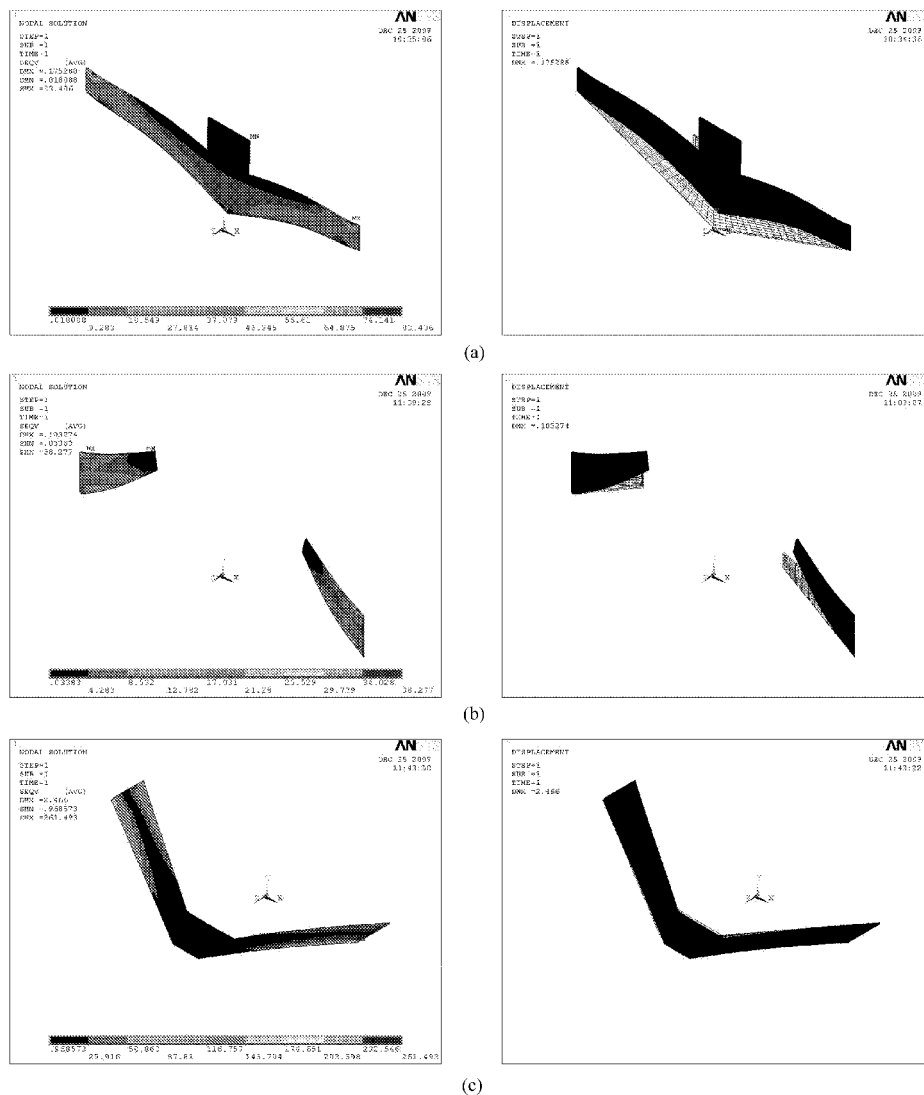


图7 3种割刀有限元分析图

Fig.7 Finite element analysis pictures of different cutters

(a) 平刀 (b) 缺口刀 (c) V形刀

处,变形均较小,满足实际使用要求。

3 割刀选型决策

在甘肃省张掖市固定垄保护性耕作试验区对3种割刀进行了田间性能试验^[5~6]。试验对比分析了3种割刀松垄作业的油耗以及相应的水分增渗效果,综合评价了松垄机具的整机工作性能,为松垄机具最佳割刀类型的选择提供数据支持。

田间油耗试验表明,在相同前进速度(4.29 km/h)下,测得平刀、缺口刀、V形刀油耗分别为4.66、4.28和5.12 L/hm²,V形刀单位面积耗油量最大,平刀次之,缺口刀最小。水分增渗试验结果显示,在同等灌溉量(1 050 m³/hm²)的条件下,春小麦拔节期灌水后3 d测得垄底未处理时其土壤体积含水率,即土壤中水分占有的体积和土壤总体积的比值为0.157。垄底平刀切割、缺口刀切割、V形刀切割

3种情况下土壤体积含水率分别为0.168、0.162、0.200,土壤平均体积含水率比垄底未处理分别增加6.8%、3.2%和27.2%。垄底V形刀切割处理水分增渗效果最佳,平刀与缺口刀水分增渗效果一般,平刀略优于缺口刀。

松垄割刀作业不仅要考虑割刀作业效果,还需结合作业成本等其他因素综合考虑。为此,利用层次分析法与功效系数法对3种割刀进行了综合效益对比分析。确定割刀理论受力、作业油耗以及土壤体积含水率增量为评价割刀综合效益的3项指标。3项指标的权重通过层次分析法求得。

河西走廊干旱少雨,农作物主要靠灌溉生长,水是这一地区迫切需要解决的问题^[18],因此土壤体积含水率增量对割刀综合效益的影响最大;面对日益增长的能源紧缺,燃油消耗对割刀综合效益的影响也比较突出,因此确定作业油耗次之;最后为割刀理

论受力。依据判断矩阵标度^[19],建立判断矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/4 \\ 5 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵 J 最大特征值 λ_{\max} 为 3.085 8, 对应特征向量为 $(0.140\ 3, 0.314\ 3, 0.938\ 9)^T$; 经过归一化处理得到权重向量为 $W = (0.10, 0.27, 0.63)^T$, 由判断矩阵一致性检验公式, 求得判断矩阵的一致性指标 I 为

$$I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (3.085\ 8 - 3) / (3 - 1) = 0.042\ 9 \quad (6)$$

式中 n ——指标数

将 I 与平均随机一致性指标 M ($n=3$ 时, M 为 0.58) 进行比较, 求得判断矩阵的一致性比例 E

$$E = I / M = 0.042\ 9 / 0.58 = 0.074 \quad (7)$$

E 小于 0.1, 判断矩阵 J 满足一致性条件。因此, 可以确定松垄割刀适用性评价指标设计合理, 且理论受力、工作油耗、土壤体积含水率增量 3 项指标权重分别为 0.10、0.27、0.63。

利用功效系数法可以解决理论受力、作业油耗两项逆向指标的正向化, 同时把指标进行无量纲化处理, 但需要明确各指标的不允许值与满意值^[20]。选取 3 种割刀各指标的最优值为该指标满意值, 各指标的最差值为该指标不允许值。根据功效系数法求得 3 种割刀各项指标的单项评价分为

$$D_i = \frac{40(x_i - x_{is})}{x_{ih} - x_{is}} + 60 \quad (8)$$

式中 D_i ——第 i 项指标评价分
 x_i ——第 i 项指标实际值

x_{is} ——第 i 项指标不允许值

x_{ih} ——第 i 项指标满意值

综合效益评价公式为

$$P = \sum_{i=1}^3 D_i W_i \quad (9)$$

式中 P ——综合评价分数

W_i ——第 i 项指标的权重

将 3 种割刀的理论受力、工作油耗以及土壤体积含水率增量代入式(8)、(9)中, 求得平刀、缺口刀、V形刀的综合评价分数分别为 69.89、74.80 和 85.34。V形刀的综合作业效益最高, 缺口刀次之, 平刀最差。

4 结论

(1) 基于土壤力学模型, 设计了平刀、缺口刀和 V 形刀 3 种割刀, 并利用纯剪切和两面楔模型计算得其切割阻力分别为 11 960、5 620 和 11 733 N。

(2) 基于有限元方法对割刀进行了静强度分析, 得出割刀的应力分布图和变形云图。结果显示, 3 种割刀设计强度均满足要求, 其中 V 形刀的最大应力最大, 平刀次之, 缺口刀最小, 且 3 种割刀所受应力均为压应力, 应力主要分布在割刀外侧; 3 种割刀最大变形位置均位于离割刀中心对称平面最近处, 变形均较小, 满足实际使用要求。

(3) 以割刀理论受力、作业油耗、土壤体积含水率增量为评价指标, 基于层次分析法与功效系数法的综合效益评价表明, 平刀、缺口刀、V 形刀 3 种割刀的综合评价分数分别为 69.89、74.80 和 85.34, V 形刀的综合作业效益最高, 为最适宜的松垄割刀。

参 考 文 献

- 高焕文, 李洪文, 李问盈. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 43~48.
Gao Huanwen, Li Hongwen, Li Wenying. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43~48. (in Chinese)
- Sayre K, Limon A, Govaerts B. Experiences with permanent bed planting systems[C] // Evaluation and Performance of Permanent Raised Bed Systems in Asia and Australia, Griffith, NSW, Australia, 2005.
- Mashum M, Kusnarta I, Tisdall J, et al. Permanent raised beds farming system in the semi arid tropics of southern Lombok, Indonesia; performance and adoption[C] // Evaluation and Performance of Permanent Raised Bed Systems in Asia and Australia, Griffith, NSW, Australia, 2005.
- 何进, 李洪文. 固定垄保护性耕作技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.
- He Jin, Li Hongwen, Kuhn N J, et al. Soil loosening on permanent raised-beds in arid northwest China[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(2): 172~183.
- 何进. 北方灌溉区固定垄保护性耕作技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
He Jin. Study on permanent raised beds in irrigation areas of Northern China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 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: 机械工业出版社, 1998.
- 翟力欣, 姬长英. 基于离散单元法的土壤力学接触模型的建立[J]. 江西农业学报, 2008, 20(9): 108~111.

- Zhai Lixin, Ji Changying. Foundation of dynamic soil model based on distinct element method[J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2008, 20(9): 108~111. (in Chinese)
- 9 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. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53~57. (in Chinese)
- 10 孙一源, 高行方, 余登苑. 农业土壤力学[M]. 北京: 农业出版社, 1985: 54~97.
- 11 闾维建. 1SQ-235型全方位深松机结构参数及总体布置的设计[J]. 淮阴工学院学报, 2003, 12(3): 47~49.
Lü Weijian. Design for structure parameter and general layout of 1SQ-235 model deep-scarifier[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2003, 12(3): 47~49. (in Chinese)
- 12 郭志军, 佟金, 任露泉, 等. 耕作部件-土壤接触问题研究方法分析[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 102~104, 112.
Guo Zhijun, Tong Jin, Ren Luquan, et al. Research method on the interacting problem of tillage tool soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 102~104, 112. (in Chinese)
- 13 徐中华, 王建华. 有限元法分析土壤切削问题的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 134~137.
Xu Zhonghua, Wang Jianhua. Advances in finite element analysis of soil cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 134~137. (in Chinese)
- 14 贾晶霞, 刘汉武, 郝新明, 等. 马铃薯收获机挖掘铲有限元静力学分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 86~88.
Jia Jingxia, Liu Hanwu, Hao Xinming, et al. Finite element analysis for blade of potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 86~88. (in Chinese)
- 15 杨欣, 佟金, 陈东辉, 等. RFT内支撑三维结构有限元静力学分析与改进设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 10~13.
Yang Xin, Tong Jin, Chen Donghui, et al. Finite element analysis on three-dimensional structural of run-flat tire insert[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 10~13. (in Chinese)
- 16 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1995: 414~433.
- 17 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: 132~182.
- 18 吴建民, 高焕文. 甘肃河西走廊水资源供需分析及耕作节水研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 36~39.
Wu Jianmin, Gao Huanwen. Analysis of the supply of and demand for water resource and research on water-saving tillage in Hexi corridor on Gansu Province [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 36~39. (in Chinese)
- 19 谢永珍. 企业家职业化与企业家评价系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2000.
Xie Yongzhen. Study on specialized entrepreneur and its evaluation system[D]. Ji nan: Shandong University, 2006. (in Chinese)
- 20 牛永环. 玉米免耕播种机适用性评价方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
Niu Yonghuan. Study on evaluation method of maize no-tillage planter suitability [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)