

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.040

残膜回收机旋转式起膜装置起膜机理分析与试验

孙岳¹ 简建明¹ 田玉泰¹ 孙发超¹ 张梦婕¹ 王士国²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000)

摘要: 针对现有残膜回收机起膜铲起膜率低、膜土分离难和工作可靠性低等问题, 提出一种旋转式起膜装置, 通过对该装置起膜过程中残膜和土壤混合物受力及运动分析, 确定了膜土能够被抛离的条件以及残膜可被弹齿“接”住的条件。通过对起膜机理的分析, 将起膜刀轴转速、起膜刀轴与输膜弹齿之间的水平距离、垂直距离作为试验因素, 以起膜率、回收率和含土率作为评价指标, 运用 Design-Expert 软件中的 Box - Benhnken Design 方法设计三因素三水平试验, 分析各因素对作业质量的影响。试验结果表明, 对起膜率影响顺序依次为: 起膜刀轴转速、垂直距离、水平距离; 对回收率影响顺序依次为: 起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离; 对含土率影响顺序依次为: 起膜刀轴转速、垂直距离、水平距离。利用 Matlab 2016a 软件中绘制上述 3 个因素的四维切片图, 分析各因素对响应指标的综合影响效应。分析结果表明, 起膜刀轴转速越高, 起膜率越高, 反之起膜率越低, 而水平距离和垂直距离对起膜率影响比较小; 起膜刀轴转速越高、水平距离越小、垂直距离越小, 回收率越高, 含土率越高, 反之, 回收率越低, 含土率越低。对影响因素进行综合优化后得到最优的工作参数组合, 起膜刀轴转速为 680 r/min, 起膜刀轴与输膜弹齿之间水平距离为 250 mm, 起膜刀轴与输膜弹齿之间垂直距离为 320 mm。对上述组合进行田间试验验证, 起膜率为 90.1%, 回收率 89.5%, 含土率 11.8%, 结果表明该装置优化方案可行。

关键词: 残膜回收机; 起膜装置; 机理分析; 田间试验

中图分类号: S223.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0304-07

Analysis and Experiment of Filming Mechanism of Rotary Film-lifting Device of Residual Film Recycling Machine

SUN Yue¹ JIAN Jianming¹ TIAN Yutai¹ SUN Fachao¹ ZHANG Mengjie¹ WANG Shiguo²

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

2. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: A rotary film-lifting device was proposed in view of the problems of low filming rate, difficult separation of membrane soil and low work reliability. Through the force and movement analysis of membrane mixture in the membrane process of the device, the conditions for the membrane and soil to be thrown away and the conditions for the residual membrane to be “stucked” by the spring teeth were determined. Through the analysis of the mechanism of filming, the horizontal distance and vertical distance between the rotating speed of knife shaft, the knife cutting axis and film spring were taken as experimental factors, and the filming rate, recovery rate and soil fraction were taken as the response indicators. The three-factor and three-level tests were designed by using the Box - Benhnken Design method in Design-Expert software, and the influence of various factors on the quality of the work was analyzed. The test results showed that the descending order of influence of filming rate was filming-cutter shaft speed, vertical distance and horizontal distance; the descending order of recovery rate was filming-cutter shaft speed, horizontal distance and vertical distance; the descending order of soil rate was film cutter shaft speed, vertical distance and horizontal distance. The four-dimensional slice diagram of the above three factors was plotted in Matlab 2016a software to analyze the comprehensive effect of each factor on the response indicators. The analysis results showed that with the increase of rotating speed of the

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701102-1)和中国农业大学基本科研业务费专项资金项目(2017TC009)

作者简介: 孙岳(1993—), 男, 硕士生, 主要从事现代农业机械装备研究, E-mail: 577950774@qq.com

通信作者: 简建明(1969—), 男, 副教授, 主要从事现代农业机械装备研究, E-mail: jamesjian@126.com

knife shaft, the filming rate was increased. The higher the rotating speed of the knife shaft was, the more the horizontal distance was. After comprehensive optimization of the influencing factors, the optimal working parameter combination was obtained. The speed of the film-cutting shaft was 680 r/min, and the horizontal distance between the film-cutting shaft and the transporting elastic teeth was 250 mm. The vertical distance between the teeth was 320 mm. The above combination was tested in the field, the filming rate was 90.1%, the recovery rate was 89.5%, and the soil rate was 11.8%. The results showed that the optimization scheme of the device was feasible.

Key words: residual film recovery machine; film-lifting device; mechanism analysis; field test

0 引言

地膜覆盖技术已广泛应用于现代农业种植,随着覆膜年数和覆膜面积的增加,残留在耕层(距离地表 0~20 cm)中的地膜也逐步增多,成为影响我国农业可持续发展的突出问题^[1]。残膜回收方式包括人工回收和机械回收,机械回收为主要手段,现有的回收机主要由起膜装置、拾膜装置、脱膜装置、卸膜装置^[2-4] 4 部分组成。其中,起膜装置对残膜回收率有着至关重要的影响,其作用包括粉碎板结土壤、翻出耕层的残膜等^[5-6]。针对起膜装置的设计,国内学者已有一定的研究。谢建华等^[7]设计了一种圆盘碎土起膜装置,建立了圆盘碎土的力学模型,并运用 ANSYS 软件进行运动仿真分析。张攀峰等^[8]设计了一种钉齿滚筒式起膜装置,为避免共振现象的发生,研究了钉齿的最小固定频率和钉齿在土壤工作中的变形和应力分布。康建明等^[9]设计了一种滑刀式起膜装置,采用非线性优化计算方法,对起膜铲的结构参数和工作参数进行了优化计算。

针对起膜装置的作用和要求,本文提出一种旋转式起膜装置,为保证起出耕层残膜,该装置工作时的入土深度保持为 25 cm 左右(弹齿未入土),可完成碎土、起膜、抛膜等一系列工作。对起膜过程中残膜-土壤混合物(简称膜土)抛离过程进行运动学分析,通过田间试验研究该起膜装置的起膜刀轴转速、起膜刀轴与输膜弹齿之间的水平距离和垂直距离等参数变化与起膜率、回收率和含土率的关系,确定最佳工作参数,为进一步提高残膜回收率提供技术和理论基础。

1 起膜装置整体结构与工作原理

起膜装置的结构如图 1 所示,主要由减速器、传动箱、旋转起膜部件等组成。装置实际工作宽度为 1 500 mm,4 个交错排列分布的起膜刀宽度为 100 mm。工作时,起膜装置向机具前进方向倾斜,由拖拉机后输出轴为起膜装置减速器提供动力,通过链传动使起膜刀在土壤耕层旋转,在碎土同时将耕层及地表残膜连同部分土壤抛送到后方间隔排列的

输膜弹齿上,土壤则从弹齿间隙以及带与弹齿轴之间的间隙回落到地面,从而实现膜土分离。

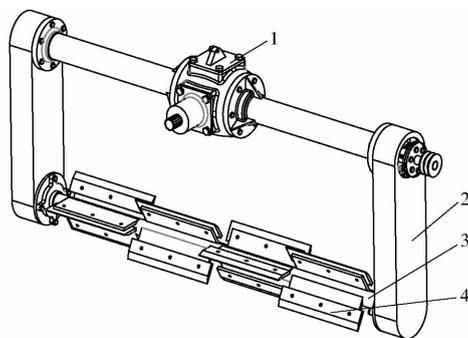


图 1 起膜装置结构示意图

Fig. 1 Sketch of film-lifting device

1. 减速器 2. 传动箱 3. 起膜刀轴 4. 起膜刀

2 起膜机理分析

2.1 膜土抛离分析

为使膜土能够被起膜部件抛离,需要对其抛离条件进行分析。膜土被抛出前做圆周运动,抛离需要在离心力的作用下克服向心综合作用力,由于其在起膜过程中运动关系复杂,致使其受力复杂,因此对受力进行简化处理,只分析起膜刀片对膜土的摩擦力^[10]。起膜刀上膜土未被抛离前受力分析如图 2 所示。图中, F_N 为膜土受到的支持力, F_L 为膜土受到的离心力。

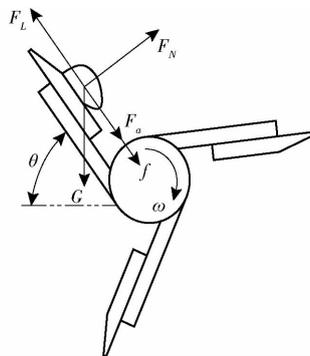


图 2 起膜刀上膜土受力分析图

Fig. 2 Force analysis diagram of film and soil on cutter

膜土被抛离的条件为

$$\frac{mv_1^2}{l_R} > mgs\sin\theta + f + F_a \quad (1)$$

式中 m ——膜土质量, kg
 v_1 ——膜土线速度, m/s
 l_R ——膜土到起膜刀轴心的距离, mm
 θ ——起膜刀面与水平面夹角, ($^\circ$)
 f ——起膜刀片对膜土的摩擦力, N
 F_a ——空气阻力, N

空气阻力与低速运动物体的速度相关, 膜土做抛物运动时属于低速运动, 假设空气阻力与速度成正比^[11-12], 即

$$F_a = -kv \quad (2)$$

式中 k ——空气粘滞阻尼系数, N·s/m
 v ——膜土速度, m/s

膜土在未离开起膜刀片前的线速度等于起膜刀的线速度, 即

$$v_1 = \frac{\pi n R}{30} \quad (3)$$

式中 n ——起膜刀轴转速, r/s

R ——膜土在起膜刀片上的位置到起膜刀轴的距离, mm

联立式(1)、(3)可解得膜土可被抛离时起膜刀轴的转速范围, 即

$$n > \frac{30}{\pi R} \left[\frac{R}{m} (F_a + f + mg \sin \theta) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

由式(4)可知, 转速越大, 膜土被抛出的速度越大, 膜土对弹齿的作用力越大, 转速过大会使得弹齿刺穿残膜, 增加回收难度; 转速过小, 膜土不能被抛到输送弹齿上实现挂膜, 不满足作业要求。因此, 起膜效果主要与起膜刀轴的转速有关, 是该装置相关工作参数选取中需要确定的试验因素。

2.2 膜土运动学分析

为了分析起膜刀匀速转动时膜土运动规律, 对膜土抛离过程进行运动学分析, 进而确定合理的工作参数。膜土被抛起, 离开起膜刀时做抛物运动, 膜土水平方向、垂直方向分位移直接决定抛膜的效果。以膜土开始被抛离前的位置为原点建立 xOy 直角坐标系, 则起膜刀片上膜土的运动轨迹分析如图3所示。图中, l_A 为起膜刀轴与输膜弹齿之间的水平距离; l_B 为膜刀轴与输膜弹齿之间的垂直距离。

通过对图3中的膜土运动轨迹分析并联合式(2)可得膜土在重力和空气阻力作用下水平方向和垂直方向分速度变化规律为

$$\begin{cases} v_x = v_2 e^{\frac{k}{m}t} \\ v_y = \left(v_2 - \frac{mg}{k} \right) e^{\frac{k}{m}t} + \frac{mg}{k} \end{cases} \quad (5)$$

式中 v_x ——膜土水平方向分速度, m/s

v_y ——膜土垂直方向分速度, m/s

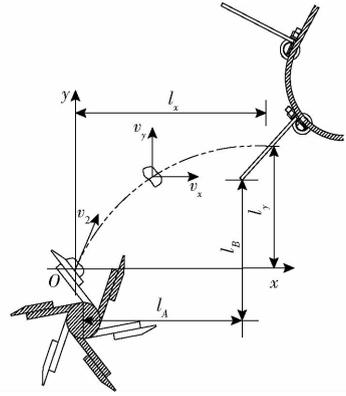


图3 膜土运动轨迹图

Fig.3 Tracking diagram of motion of film and soil

v_2 ——膜土初速度, m/s

t ——膜土离开起膜刀片后运动的时间, s

对式(5)从膜土开始抛离时刻到与弹齿接触结束时刻 t 进行积分, 可得到膜土在重力和空气阻力作用下水平方向和垂直方向分位移为

$$\begin{cases} l_x = \int_0^t v_x e^{\frac{k}{m}t} dt = v_2 \frac{m}{k} (e^{\frac{k}{m}t} - 1) \\ l_y = \int_0^t \left(v_2 - \frac{mg}{k} \right) e^{\frac{k}{m}t} + \frac{mg}{k} dt = \\ \frac{m}{k} \left[\left(v_2 - \frac{mg}{k} \right) (e^{\frac{k}{m}t} - 1) + \frac{mg}{k} t \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中 l_x ——膜土水平方向分位移, mm

l_y ——膜土垂直方向分位移, mm

由式(6)可知, 若使抛膜效果达到设计要求, 需要膜土的水平方向分位移大于起膜刀轴与输膜弹齿在水平方向的距离, 其垂直方向分位移大于起膜刀轴与输膜弹齿在垂直方向的距离。若间距过大, 弹齿挂膜效果不理想, 若间距过小, 输膜带带入到膜箱的土壤增加。因此, 将水平距离和垂直距离作为该装置相关工作参数选取中需要确定的试验因素。

3 田间试验

3.1 试验条件

后抛式残膜回收机起膜装置于2018年5月在河北省固安县柳泉镇西市村收获后白薯地进行田间试验, 如图4所示。试验地块长度为100 m; 土壤类型为粘性壤土, 深度25 cm处平均土壤紧实度为3.74 MPa, 平均含水率约20%; 地膜为0.008 mm厚; 地表无杂草, 土块比较多, 试验所用的牵引机具为东方红-404型拖拉机, 动力输出轴转速540~720 r/min。

3.2 试验评价指标的测定

在试验地内随机选取17个测试区进行试验; 试验前通过5点取样法先测得表层及耕层的残膜滞留量^[13]; 为了验证起膜装置起膜的性能效果和获得最



图4 田间试验

Fig. 4 Field test

优工作参数,分别以起膜率、回收率和含土率作为评价指标,每次试验结束后将起至地表的残膜和膜箱中的残膜洗净、晾干后称量。评价指标计算方法如下:

$$Y_1 = \frac{M_1}{M_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中 Y_1 ——起膜率, %

M_1 ——起膜装置起出的残膜质量, kg

M_0 ——试验地块中残膜总质量, kg

$$Y_2 = \frac{M_2}{M_1} \times 100\% \quad (8)$$

式中 Y_2 ——回收率, %

M_2 ——收膜箱内残膜的质量, kg

$$Y_3 = \frac{M_3}{M_2 + M_3} \times 100\% \quad (9)$$

式中 Y_3 ——含土率, %

M_3 ——收膜箱内土壤的质量, kg

3.3 试验设计与数据处理

依据式(4)、(6)确定的相关试验因素以及起膜装置的设计要求,将起膜率 Y_1 、回收率 Y_2 、含土率 Y_3 作为响应值,对起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离进行试验研究。其中,起膜刀轴转速通过测速仪显示数值进行调整,水平距离和垂直距离通过设计的起膜装置与输送装置的连接架进行调整。本试验利用 Design-Expert 10.0.3 进行三因素三水平组合试验^[14-16],并对影响起膜率、回收率、含土率的3个主要参数组合完成优化,考虑到牵引机器的工作量程、起膜装置的设计特点、连接架的设计量程、耕层残膜的分布情况,选取起膜刀轴转速 540~720 r/min,水平距离 200~400 mm,垂直距离 250~350 mm,试验因素编码如表1所示。

4 试验结果分析与参数优化

4.1 响应模型建立与显著性检验

试验结果如表2所示(A 、 B 、 C 为因素编码值),针对表中的起膜率、回收率、含土率,采用 Design-Expert 10.0.3 软件进行多元回归拟合分析。建立

表1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors and coding

编码	因素		
	起膜刀轴转速 $n/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	水平距离 $l_x/$ mm	垂直距离 $l_y/$ mm
-1	540	200	250
0	630	300	300
1	720	400	350

表2 试验设计方案及结果

Tab.2 Test design and response results

试验号	A	B	C	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	0	-1	72.6	46.8	5.3
2	1	1	0	91.8	75.2	10.3
3	1	0	-1	92.3	92.2	27.6
4	1	0	0	89.4	87.3	16.1
5	0	0	0	83.6	82.7	7.6
6	-1	0	1	75.6	38.8	3.9
7	0	-1	1	86.3	81.3	6.9
8	0	0	0	83.9	83.3	7.8
9	1	0	1	89.9	84.1	9.6
10	-1	-1	0	74.3	66.1	4.5
11	0	-1	-1	83.3	87.7	19.6
12	1	0	0	91.3	91.5	14.8
13	1	-1	0	90.6	92.7	24.3
14	0	1	1	85.2	56.8	3.2
15	0	0	1	87.7	76.6	6.1
16	0	1	-1	84.6	63.3	5.6
17	1	0	0	90.1	89.4	15.6

起膜率 Y_1 、回收率 Y_2 、含土率 Y_3 对起膜刀轴转速 A 、水平距离 B 、垂直距离 C 3个自变量的二次多项式响应面回归模型

$$Y_1 = 84.09 + 8.60A - 0.021B + 0.77C + 0.69AB -$$

$$1.35AC - 0.60BC - 2.22A^2 + 0.18B^2 + 0.90C^2$$

$$Y_2 = 82.67 + 20.95A - 13.79B - 3.45C + 6.60AB -$$

$$0.025AC - 0.025BC - 13.31A^2 - 5.83B^2 - 4.05C^2$$

$$Y_3 = 7.33 + 6.83A - 4.59B - 4.41C - 2.61AB -$$

$$4.15AC + 2.58BC + 2.19A^2 + 0.044B^2 + 1.90C^2$$

对3个回归方程进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表3所示。由表3数据分析可知,起膜率、回收率、含土率的响应面模型 $P_1 < 0.0001$ 、 $P_2 < 0.0001$ 、 $P_3 < 0.0001$,表明回归模型高度显著;失拟项 $\rho > 0.05$ (分别为 0.2159、0.1556、0.0659),表明回归方程拟合度高;其决定系数 R^2 分别为 0.9855、0.9875、0.9890,模型误差比较小,可以用此模型对起膜装置的工作参数进行优化。通过对比各因素的 F ,可分析起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离对起膜率、回收率、含土率的影响显著性,结果为:起膜刀轴转速对起膜率影响极显著,各因素影响

大小顺序为:起膜刀轴转速、垂直距离、水平距离;起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离对回收率影响极显著,影响大小顺序为:起膜刀轴转速、垂直

距离;起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离对含土率影响极显著,影响大小顺序为:起膜刀轴转速、垂直距离、水平距离。

表3 回归模型方差分析
Tab.3 Variance analysis of regression model

变异来源	Y_1				Y_2				Y_3			
	平方和	自由度	F_1	P_1	平方和	自由度	F_2	P_2	平方和	自由度	F_3	P_3
模型	599.67	9	52.79	<0.000 1	4 228.8	9	61.63	<0.000 1	858.48	9	69.76	<0.000 1
A	446.92	1	354.12	<0.000 1	2 653.18	1	348.01	<0.000 1	282.06	1	206.29	<0.000 1
B	2.0×10^{-3}	1	2.0×10^{-3}	0.966 0	1 028.37	1	134.89	<0.000 1	105.16	1	76.91	<0.000 1
C	5.14	1	4.08	0.083 3	103.74	1	13.61	0.007 8	152.61	1	111.61	<0.000 1
AB	0.98	1	0.78	0.407 4	89.05	1	11.68	0.011 2	13.87	1	10.15	0.015 4
AC	7.29	1	5.78	0.047 2	2.5×10^{-3}	1	3.3×10^{-3}	0.986 1	68.89	1	50.38	0.000 2
BC	1.44	1	1.14	0.320 9	2.5×10^{-3}	1	3.3×10^{-3}	0.986 1	26.52	1	19.4	0.003 1
A^2	15.13	1	11.99	0.010 5	543.01	1	71.23	<0.000 1	14.63	1	10.7	0.013 7
B^2	0.11	1	0.08	0.781 3	116.27	1	15.25	0.005 9	6.5×10^{-3}	1	4.7×10^{-3}	0.947 1
C^2	2.58	1	2.04	0.195 9	51.83	1	6.8	0.035	11.42	1	8.35	0.023 3
残差	8.83	7			53.37	7			9.57	7		
失拟	6.94	4	2.75	0.215 9	44.37	4	3.7	0.155 6	8.69	4	7.41	0.065 9
误差	1.89	3			9	3			0.88	3		
总和	608.5	16			4 282.17	16			868.05	16		

注: $P < 0.01$ 为极显著; $0.01 < P < 0.05$ 为显著; $P > 0.05$ 为不显著。

4.2 各因素对指标的影响效应分析

为了更加直观地分析起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离对起膜率、回收率、含土率的影响,依据建立的回归模型,利用 Matlab 2016a 软件绘制四维切片图来描述各因素对指标的影响效应^[17-19]。

起膜率与起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离 3 个因素的影响效应四维切片图如图 5 所示,总体影响趋势为:起膜刀轴转速越高,则起膜率越高,反之起膜率越低,而水平距离和垂直距离对起膜率影响不显著。结果原因分析:在拖拉机工作的单位距离内,起膜刀轴转速越高,膜土被抛出的水平位移和垂直位移越大,膜土散落的面积越大,耕层残膜从土壤中分离出抛至地表的数量越多。由于后面的输膜带的存在,抛出的位移大的地膜和少部分土壤直接通过输膜带进入膜箱,位移小的地膜一部分被抛至地表,一部分被土壤重新掩埋。而水平距离和垂直距离的改变只是改变了输膜带的位置,起膜装置的位置不改变,对起膜率的影响比较小。

回收率与起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离 3 个因素的影响效应四维切片图如图 6 所示,总体影响趋势为:起膜刀轴转速越高、水平距离越小、垂直距离越小,回收率越高,反之回收率越低。结果原因分析:起膜刀轴转速越高,膜土的水平位移和垂直位移越大。水平距离和垂直距离越小,残膜两个方向的位移相对于各自的间距越大,输膜带的弹齿“接”到的残膜就越多,回收率也就越高。

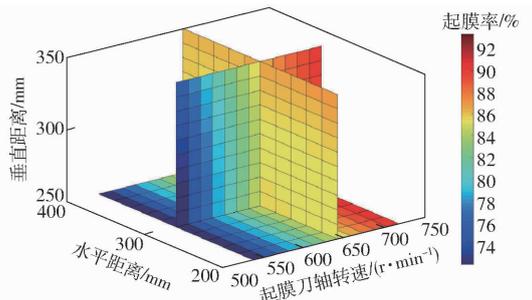


图5 起膜率与起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离 3 个因素的四维切片图

Fig.5 Four-dimensional slice diagram between filming rate and rotation speed, horizontal distance and vertical distance

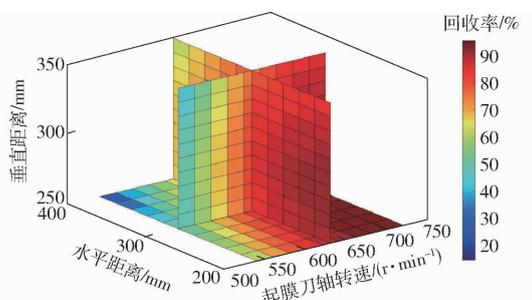


图6 回收率与起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离 3 个因素的四维切片图

Fig.6 Four-dimensional slice diagram between recycling rate and rotation speed, horizontal distance and vertical distance

含土率与起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离 3 个因素的影响效应四维切片图如图 7 所示,总体影响趋势为:起膜刀轴转速越高、水平距离越小、垂

直距离越小,含土率越高,反之含土率越低。结果原因分析:起膜刀轴转速越高,膜土的水平位移和垂直位移越大,水平距离和垂直距离越小,土壤两个方向的位移相对于各自的间距越大,输膜带“接”到的土壤就越多,含土率也就越高。

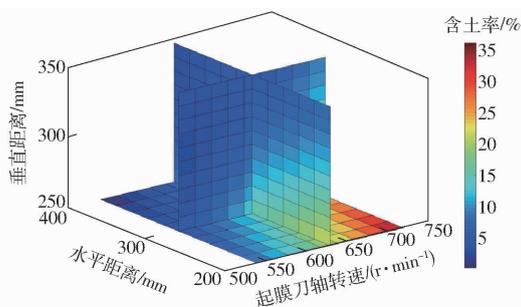


图7 含土率与起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离3个因素的四维切片图

Fig.7 Four-dimensional slice diagram between soil rate and rotation speed, horizontal distance and vertical distance

4.3 参数优化与试验验证

针对起膜率高、回收率高、含土率低的收膜作业要求,应用 Design-Expert 10.0.3 软件的优化模块对起膜过程中的工作参数进行优化^[20]。

目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(n, l_x, l_y) \\ \max Y_2(n, l_x, l_y) \\ \min Y_3(n, l_x, l_y) \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} 540 \text{ r/min} \leq n \leq 720 \text{ r/min} \\ 200 \text{ mm} \leq l_x \leq 400 \text{ mm} \\ 250 \text{ mm} \leq l_y \leq 350 \text{ mm} \end{cases}$$

得到起膜装置最优作业参数:起膜刀轴转速 679.06 r/min,水平距离 252.92 mm,垂直距离 323.49 mm,此时起膜率 88.3%,回收率 91.1%,含土率 11.3%。

为了验证优化结果可行性,现按照最优工作参数在河北省固安县柳泉镇西市村收获后白薯地进行验证试验,验证所用的牵引机具为东方红-404型拖拉机,试验共进行3次,并取3次结果的平均值作为最终试验结果。为方便参数的调整,现设定起膜刀轴转速为 680 r/min,水平距离为 250 mm,垂直距离为 320 mm,得到最佳工作参数时性能:起膜率为 90.1%,回收率为 89.5%,含土率为 11.8%,试验结果与理论值十分接近。考虑到实际工作过程中存在干扰,可以认为建立的回归模型是可靠的。

5 结论

(1)针对现有耕层残膜回收机起膜效果不佳的现状,提出了一种旋转式起膜装置,并对该装置的起膜、抛膜机理进行了分析,并通过试验验证了该装置工作的可行性。

(2)起膜装置各因素对起膜率影响大小依次为:起膜刀轴转速、垂直距离、水平距离;对回收率影响大小依次为:起膜刀轴转速、水平距离、垂直距离;对含土率影响大小依次为:起膜刀轴转速、垂直距离、水平距离。

(3)应用四维切片图分析各因素对响应指标的综合影响效应:起膜刀轴转速越高,起膜率越高,反之起膜率越低,而水平距离和垂直距离对起膜率影响比较小;起膜刀轴转速越高、水平距离越小、垂直距离越小,回收率越高,含土率越高,反之,回收率越低,含土率越低。

(4)通过优化求解,得到其最佳作业参数为:起膜刀轴转速 680 r/min,水平距离 250 mm,垂直距离 320 mm,进行田间试验验证,起膜率为 90.1%,回收率为 89.5%,含土率为 11.8%。

参 考 文 献

- 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6):1-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170601&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.001.
ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1-14. (in Chinese)
- 张惠友,侯书林,那明君,等. 收膜整地多功能作业机的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8):130-134.
ZHANG Huiyou, HOU Shulin, NA Mingjun, et al. Multifunctional machine for retrieving theused plastic film after harvesting and soi preparation [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 130-134. (in Chinese)
- 侯书林,张淑敏,孔建铭,等. 弹齿式收膜机主要结构设计[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(2):18-22.
HOU Shulin, ZHANG Shumin, KONG Jianming, et al. Development of spring-tooth plastic film collecting machine [J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(2):18-22. (in Chinese)
- 谢建华,陈学庚,孙超伟. 杆齿式残膜回收机卸膜过程分析及高速摄像试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10):17-24.
XIE Jianhua, CHEN Xuegeng, SUN Chaowei. Unloading film process analysis and high-speed photography experiment of pole-tooth residual plastic film collector [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 17-24. (in Chinese)

- 5 王海新,张学军,张朝书,等.基于Solidworks起膜铲设计及模糊评价[J].农机化研究,2016,38(11):55-57,63.
WANG Haixin, ZHANG Xuejun, ZHANG Chaoshu, et al. Based on Solidworks film shovel design and fuzzy evaluation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11):55-57,63. (in Chinese)
- 6 张琴,李亚丽,王保爱,等.残膜捡拾机起膜铲的设计与仿真[J].中国农机化学报,2016,37(7):33-37.
ZHANG Qin, LI Yali, WANG Baoai, et al. Design and simulation on loosening shovel of residual plastic film pickup machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7):33-37. (in Chinese)
- 7 谢建华,曹晓冉,巩怀仁,等.圆盘碎土起膜装置仿真分析与试验[J].中国农机化学报,2016,37(8):5-8.
XIE Jianhua, CAO Xiaoran, GONG Huairan, et al. Simulation analysis and experiment of disc crushing soil and curl-up film device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(8):5-8. (in Chinese)
- 8 张攀峰,胡灿,王旭峰,等.旋耕钉齿式耕层残膜回收机起膜部件动力学分析[J].农机化研究,2018,40(4):14-18.
ZHANG Panfeng, HU Can, WANG Xufeng, et al. Kinetic analysis of rotary tillage nail tooth plastic film recycling machine hook film unit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4):14-18. (in Chinese)
- 9 康建明,王士国,颜利民,等.残膜回收机起膜铲设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):143-148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s022&journal_id=jcsa. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.022.
KANG Jianming, WANG Shiguo, YAN Limin, et al. Design and experiment of loosen shovel installed on plastic film collecting machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):143-148. (in Chinese)
- 10 娄秀华,张东兴,张淑敏,等.1MS-II型地膜回收机起膜铲动力性能试验分析[J].农业机械学报,2004,35(5):67-69.
LOU Xiuhua, ZHANG Dongxing, ZHANG Shumin, et al. Experimental investigation on performance of loosening shovel of 1MS-II polythene film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5):67-69. (in Chinese)
- 11 赵丽特,范东华,陈毅湛.以乒乓球为例分析旋转球的受力及飞行轨迹[J].物理与工程,2017,27(2):56-60.
ZHAO Lite, FAN Donghua, CHEN Yizhan. Analysis of the force and the flying route of rotating balls with table tennis as an example[J]. Physics and Engineering, 2017, 27(2):56-60. (in Chinese)
- 12 蔡志东,陆建隆.考虑空气阻力时铅球最佳投掷角的参数方程和实用方程[J].大学物理,2006,25(10):16-22.
CAI Zhidong, LU Jianlong. Parameter equation and practical equation of optimum putting angle of a shot in considering air resistance[J]. College Physics, 2006, 25(10):16-22. (in Chinese)
- 13 中国机械工业联合会.残地膜回收机标准 GB/25412—2010[S].北京:中国标准出版社,2011.
- 14 康建明,陈学庚,温浩军,等.基于响应面法的梳齿式采棉机采收台优化设计[J/OL].农业机械学报,2013,44(增刊2):57-61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s212&journal_id=jcsam=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.012.
KANG Jianming, CHEN Xuegeng, WEN Haojun, et al. Optimization of comb-type cotton picker device based on response surface methodology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):57-61. (in Chinese)
- 15 任露泉.试验优化设计与分析[M].北京:高等教育出版社,2003.
- 16 王学农,史建新,郭俊先,等.悬挂式棉秆粉碎还田搂膜机搂膜机构的设计与试验研究[J].农业工程学报,2008,24(1):135-140.
WANG Xuenong, SHI Jianxin, GUO Junxian, et al. Experimental study and design on film aking mechanism of hanging film raker with cotton stalk crushing and returning to field[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1):135-140. (in Chinese)
- 17 游兆延,胡志超,吴惠昌,等.1MCDS-100A型铲筛式残膜回收机的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(9):10-18.
YOU Zhaoyan, HU Zhichao, WU Huichang, et al. Design and experiment of 1MCDS-100A typed shovel-sieve residual film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9):10-18. (in Chinese)
- 18 陈杰. MATLAB 宝典[M].北京:电子工业出版社,2013.
- 19 王东伟,尚书旗,韩坤.4HJL-2型花生联合收获机摘果机构的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(14):15-25.
WANG Dongwei, SHANG Shuqi, HAN Kun. Design and test of picking mechanism in 4HJL-2 peanut combines[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14):15-25. (in Chinese)
- 20 由佳翰,张本华,温浩军,等.铲齿组合式残膜捡拾装置设计与试验优化[J/OL].农业机械学报,2017,48(11):97-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.012.
YOU Jiahao, ZHANG Benhua, WEN Haojun, et al. Design and test optimization on spade and tine combined residual plastic film device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11):97-104. (in Chinese)