

双动力回转振动式番茄果秧分离装置优化与试验

郝朝会 杨学军 周军平 刘立晶 王锦江 赵金辉

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为满足自走式番茄收获机果秧分离装置国产化适应性的需要,采用响应曲面分析法对果秧分离装置性能进行优化研究。以激振器主轴转速、激振器偏心块质量、滚筒自转转速和番茄果秧的喂入量为影响因子,以果实分离率、破损率、含杂率为响应指标,利用 Matlab 软件进行响应面分析,建立了多元数学回归模型,运用决定系数 R^2 、 P 值、残差的方差 S^2 等分析了预测模型的可信性;并基于响应曲面分析了试验因素对试验指标的影响,探究了因素间的影响规律及最佳水平组合,并结合非线性优化计算方法,对果实分离率、破损率、含杂率进行了优化计算。结果表明:最优参数组合为:激振器主轴转速 342.86 r/min、激振器偏心块质量 40 kg、滚筒自转转速 22 r/min 和番茄果秧喂入量 19 kg/s 时,对应的果实分离率、破损率和含杂率分别为 98.33%、3.37% 和 4.17%。经试验验证,响应面法所得到的果秧分离参数是可行的。

关键词: 加工番茄收获机; 回转振动式; 果秧分离装置; 响应曲面; 回归分析

中图分类号: S223.94 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)S0-0241-08

Optimization and Validation of Double Power Hybrid Rotary Vibration Type Tomato Fruit Separation Device

Hao Zhaohui Yang Xuejun Zhou Junping Liu Lijing Wang Jinjiang Zhao Jinhui

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to achieve localization adaptability of self-walking type tomato harvesting machine fruit separation device, the fruit separation device performance was optimized with the method of response surface analysis. The oscillator spindle speed, the oscillator eccentric mass, roller rotation speed and tomato feeding volume were chosen as the influence factors, and the fruit separation rate, breakage rate and impurity rate were used as the response indexes, a multiple regression model was established based on the response surface analysis with Matlab software, and the credibility of the prediction model was analyzed by using the R^2 , P and the variance of the residual S^2 ; the effects of experimental factors on test index were analyzed based on the response surface method and the influence factors and the best combination of level were achieved, and combined with the nonlinear optimization method, the optimization calculation of fruit separation rate, damage rate and impurity rate were carried out. The results showed that when the oscillator spindle speed was 342.86 r/min, vibrator eccentric mass was 40 kg, roller rotation speed was 22 r/min and tomato feed quantity was 19 kg/s, the fruit separation rate, broken rate and impurity rate were 98.33%, 3.37% and 4.17% respectively. By the experiment, tomato separation parameters got by response surface method were feasible; the research result offered the theoretical foundation and scientific basis for the further study of the processing tomato vibration separation technology, also for fruit vibration harvesting technology parameters optimization.

Key words: processing tomato harvesting machine; rotary vibration; fruit separation device; response surface; regression analysis

收稿日期: 2016-07-15 修回日期: 2016-08-22

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD20B05)

作者简介: 郝朝会(1984—),男,博士生,主要从事农业机械装备与关键技术研究,E-mail: kkk-875@163.com

通信作者: 杨学军(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化装备研究,E-mail: camms@263.net

引言

近些年中国加工番茄的种植面积都稳定在 $6.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 左右,加工番茄的规模化种植和加工工业都得到了较快的发展,对加工番茄的机械化采收提出了更高的要求。目前国内加工番茄机械化采收主要以进口国外番茄收获机为主,采收质量基本能够满足国内番茄采收需求,但购机成本和维修成本高、适应性差等问题凸显,国产番茄收获机因采收性能和可靠性等问题还不能很好地被市场认可,尚需进一步优化和提升^[1-3]。

加工番茄的机械化收获过程中,果秧分离是重要环节之一,直接决定番茄收获的质量。果秧分离装置是将番茄果实分离的装置,其作业效果不仅影响整机的性能,更关系到农户的经济利益^[4-7]。国外学者和相关企业对振动滚筒式番茄果秧分离装置进行了研究和改进,国内学者和相关企业也做了很多研究工作,李成松等对振动滚筒式果秧分离装置激振器进行了运动过程分析,建立了运动的数学模型,并运用高速摄像技术验证了模型的正确性^[8];毕新胜等对回转滚筒式果秧分离机构参数进行了正交试验验证和优化,得到最优参数组合为:滚筒转速 21 r/min,凸轮盘转速 42 r/min,拨杆振幅 110 mm^[9-11];王丽红等采用 CCD 设计与响应曲面分析对番茄果秧分离性能进行了优化研究,得到最佳参数组合为:收获生产率 34.2 t/h,摇摆器转速为 409.3 r/min,输料链速为 0.71 m/s^[4]。赵金辉等发明一种双动力回转振动式果秧分离装置,并进行了番茄收获机样机的研制和试验^[12]。以上国内外研究对番茄果秧分离装置相关结构和参数、番茄果秧性状^[13-17] 都有涉及,但对激振器偏心块质量变化对果秧分离性能影响的研究未曾涉及。

本文在双动力回转振动式番茄果秧分离试验台上进行试验,采用多元回归分析方法对试验结果进行分析,并运用响应曲面分析法研究激振器偏心块质量等试验参数组合对番茄果秧分离性能的影响,并通过试验验证模型的正确性。

1 材料与方法

1.1 双动力回转振动式番茄果秧分离试验台结构与原理

双动力回转振动式果秧分离试验台主要由可变参数果秧分离装置、挡秧杆、拖秧杆、上料装置、激振器主轴电动机、集果箱、滚筒自转电动机、机架体等组成,如图 1 所示。

在试验前,人为将切割掉根部的番茄植株模拟

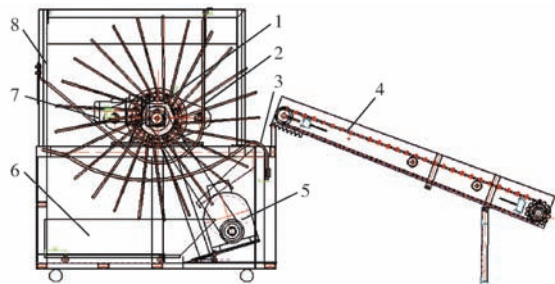


图1 双动力回转式番茄果秧分离试验台结构图

Fig.1 Structure diagram of double power rotary tomato fruit separation test bench

1. 可变参数果秧分离装置 2. 挡秧杆 3. 拖秧杆 4. 上料装置
5. 激振器主轴电动机 6. 集果箱 7. 滚筒自转电动机 8. 机架体

机器采收的状态均匀放到上料装置上待试验,其中,上料装置、激振器主轴电动机、滚筒自转电动机都是独立控制,并能人为进行调节,试验台的主要部件为可变参数果秧分离装置,如图 2 所示。

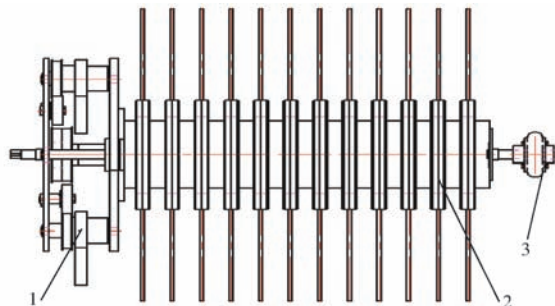


图2 可变参数番茄果秧分离装置结构图

Fig.2 Structure diagram of variable parameters of tomato separation device

1. 激振器 2. 滚筒组件 3. 弹性阻尼器

可变参数番茄果秧分离装置由可变参数激振器、可变参数滚筒组件和弹性阻尼器组成,其中可变参数激振器的偏心块质量可调;可变参数滚筒组件的振动杆参数、振动圈间距等均可调。

番茄果秧振动分离装置动力从两端输入,激振器端动力输入用于激振器工作产生一定频率的振动,阻尼器端动力输入用于果秧振动分离装置的自转。试验台工作过程中,被切割掉的番茄果秧由上料装置输送到振动分离滚筒工作区,滚筒上的振动杆穿插在番茄果秧之间,同时振动杆在激振器的作用下产生一定频率和振幅的变速周期振动,迫使番茄果秧振动,从而使番茄果实分离,分离后的番茄果实落在振动滚筒下方的集果箱里;而番茄秧随着滚筒较慢速度的自转,被抛甩到机身外,完成番茄的果秧分离。

1.2 试验

试验时间:2014 年 9 月。试验地点:新疆石河子市呼图壁农场番茄种植田,加工番茄果秧分离试

验如图 3 所示。



图 3 加工番茄果秧分离试验

Fig.3 Fruit separation experiment of processing tomato

试验指标:根据 NY/T 1824—2009《番茄收获机作业质量》等相关规定,试验评价指标为番茄果实的分离率、破损率、含杂率。

试验用番茄品种:屯河 8 号。

试验方法:用镰刀等工具田间采收去掉根部的番茄植株,运送到试验地点,进行现场试验;为保证数据的可靠性,当天采收的番茄植株当天完成试验。设定上料装置带速为 1 m/s,试验中,喂入量设定为 1 s 时间内处理的番茄植株质量。

试验设计:综合考虑现场试验条件及可操作性,选定本次正交试验的因素为 4 个:激振器主轴的转速(因子 A)、激振器偏心块的质量(因子 B)、滚筒自转的转速(因子 C)、番茄果秧的喂入量(因子 D)。评价指标为 3 个:番茄果实的分离率 η_1 、果实破损率 η_2 、含杂率 η_3 。其他参数在前期设计分析的基础上取理论最优值,对相关参数做定值处理,如表 1 所示。

表 1 定值参数

Tab.1 Fixed value parameter table

振动杆 材质	振动杆	振动杆	振动杆	周圈	振动圈	阻尼器 型号
	直径/ mm	角度/ (°)	长度/ mm	杆数/ 根	间距/ mm	
FR-4 环氧树脂	12	15	450	25	100	UL6

利用正交试验设计表 $L_{16}(4^5)$,设计 4 因素 4 水平正交试验。

试验水平:根据试验台设计分析和采收经验,设定试验水平表如表 2 所示。

在试验中,通过调节变频器的频率来改变电动机的转速,进而实现激振器主轴转速的调节;喂入量定义为:传送带以 1 m/s 的速度在 1 s 时间内喂入番茄果秧的质量;在试验中,经过实地测量,番茄果实和果秧的比重约为 0.6,生产率为每小时处理的番茄果实质量。试验因素换算表如表 3 所示。

表 2 试验因素水平

Tab.2 Test factor and level

水平	因素			
	主轴转速 A/ (r·min ⁻¹)	偏心块质量 B/kg	自转转速 C/ (r·min ⁻¹)	喂入量 D/ (kg·s ⁻¹)
1	240.0	25	15	19.0
2	274.29	30	20	21.5
3	308.57	35	25	24.0
4	342.86	40	30	26.5

表 3 试验因素换算

Tab.3 Conversion of test factor

激振器主轴		喂入量	
频率/Hz	转速/(r·min ⁻¹)	质量/kg	生产率/(t·h ⁻¹)
35	240.00	19.0	41.04
40	274.29	21.5	46.44
45	308.57	24.0	51.84
50	342.86	26.5	57.24

2 试验结果分析与讨论

2.1 多元回归模型的建立与讨论

具体试验安排和结果如表 4 所示。

表 4 正交试验设计与结果

Tab.4 Orthogonal experiment design and result

试验 序号	因子				性能参数		
	A	B	C	D	η_1 /%	η_2 /%	η_3 /%
1	1	1	1	1	91.77	4.20	2.13
2	1	2	2	2	94.10	2.51	1.79
3	1	3	3	3	92.13	2.20	2.70
4	1	4	4	4	93.83	2.15	3.20
5	2	1	2	3	92.10	2.42	2.10
6	2	2	1	4	93.58	3.18	4.30
7	2	3	4	1	94.31	1.51	2.40
8	2	4	3	2	97.72	1.74	2.10
9	3	1	3	4	89.30	2.75	4.20
10	3	2	4	3	91.20	1.91	3.80
11	3	3	1	2	96.10	3.24	2.60
12	3	4	2	1	98.10	2.71	2.30
13	4	1	4	2	94.40	3.10	4.40
14	4	2	3	1	96.11	2.80	3.30
15	4	3	2	4	95.72	2.90	4.80
16	4	4	1	3	97.10	4.20	5.10

利用 Matlab 软件对试验数据进行多元回归分析,采用全回归法来寻求预测模型的最简方程,并设置显著水平 $\alpha=0.05$,得到番茄果实的分离率 y_1 、果实破损率 y_2 、含杂率 y_3 关于激振器主轴转速(因子 A) x_1 、偏心块质量(因子 B) x_2 、振动滚筒自转转速(因子 C) x_3 、番茄果实喂入量(因子 D) x_4 的预测响应模型

$$y_1 = 87.9371 + 0.0069x_1^2 - 0.4269x_1 + 0.0027x_2^2 + 0.1302x_2 - 0.0075x_3^2 + 0.2404x_3 - 0.0053x_4^2 + 0.3177x_4 \tag{1}$$

$$y_2 = 41.0843 + 0.0115x_1^2 - 0.9396x_1 + 0.0076x_2^2 - 0.5186x_2 + 0.0087x_3^2 - 0.4868x_3 + 0.0022x_4^2 - 0.2031x_4 \tag{2}$$

$$y_3 = 24.5319 + 0.0091x_1^2 - 0.6426x_1 - 0.0004x_2^2 + 0.0206x_2 + 0.0116x_3^2 - 0.5204x_3 + 0.0051x_4^2 - 0.3545x_4 \tag{3}$$

对预测模型的相关分析如表 5 所示。

表 5 预测模型分析
Tab.5 Forecast model analysis

响应量	预测模型	决定系数 R^2	P 值	残差的方差 S^2
果实分离率	y_1	0.837 5	0.031 0	2.176 6
果实破损率	y_2	0.965 5	0.000 2	0.043 7
含杂率	y_3	0.925 4	0.002 5	0.189 8

从表 5 中可以看出果实分离率的决定系数为 0.837 5,小于 0.9,但 P 值为 0.031 0,在 5% 的置信区间里,模型是可信的;果实破损率、含杂率的决定系数分别为 0.965 5 和 0.925 4,都大于 0.9,说明回归模型拟合良好,同时 P 值分别为 0.000 2 和 0.002 5,都在 5% 的置信区间里,模型是可信的;其中残差的方差 S^2 表示预测模型的拟合精度,数值越低,表示方程的拟合精度越高。

运用 Matlab 软件对试验数据作残差的误差图,如图 4 所示。从图 4 中可以看出试验数据和拟合数据的残差离零点是随机分布的,说明多元回归拟合方程拟合情况良好,所有试验数据值都在 95% 的置信区间内,验证了试验拟合的多元回归方程的可信性。

2.2 试验因子对试验结果的影响分析

运用 Matlab 软件对试验数据进行了回归分析及多元回归模型的建立,以及决定系数 R^2 、 P 值、残差的方差 S^2 检验,同时运用残差的误差分析验证了试验因子与试验指标的多元回归方程模型的置信度较高。为进一步研究试验因子和试验指标的影响关系,运用 Matlab 软件对回归方程进行模拟计算,得到各因子及其交互作用与试验指标之间的影响曲面图。

2.2.1 各试验因素对果实分离率的影响分析

图 5a 为激振器主轴转速 A 和滚筒自转转速 C 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 B (偏心块质量) 对果实分离率 η_1 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出曲面变化比较陡峭,说明喂入量和偏心块质量对果实分离率的影响显

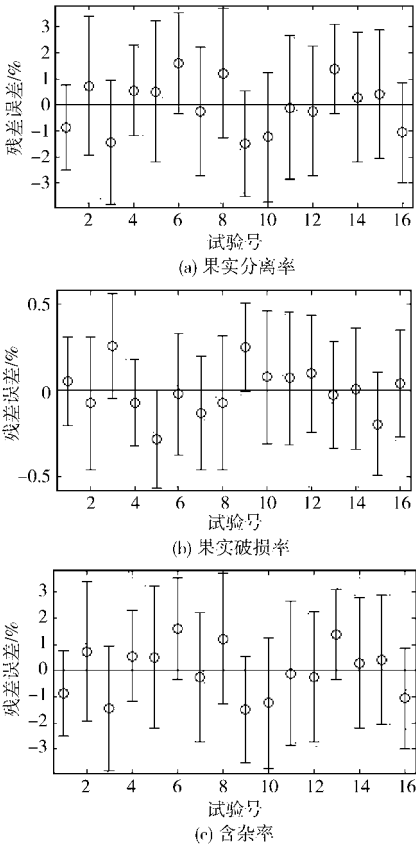


图 4 残差的误差分析图
Fig.4 Error analysis of residual error

著;随着偏心块质量的增加,果实分离率升高;随着喂入量的增加果实分离率缓慢降低;从等高线可以看出,当喂入量取小值,偏心块质量取大值时,果实的分离率较高。

图 5b 为激振器主轴转速 A 和偏心块质量 B 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 C (滚筒自转转速) 对果实分离率 η_1 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出随着滚筒自转转速的升高,果实分离率逐渐降低;随着喂入量的增加果实分离率逐渐降低,但喂入量较自转转速对分离率的影响大;从等高线可以看出当喂入量和滚筒自转转速同取小值时,果实的分离率较高。

图 5c 为偏心块质量 B 和滚筒自转转速 C 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 A (激振器主轴转速) 对果实分离率 η_1 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出曲面变化陡峭,喂入量和激振器主轴转速对果实分离率的影响显著;从等高线可以看出当喂入量取小值时,激振器主轴转速取大值时,果实的分离率较高。

图 5d 为偏心块质量 B 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 A (激振器自转转速) 和因素 C (滚筒自转转速) 对果实分离率 η_1 的影响曲面图和等高线图,从曲面图可看出激振器主轴转速相对

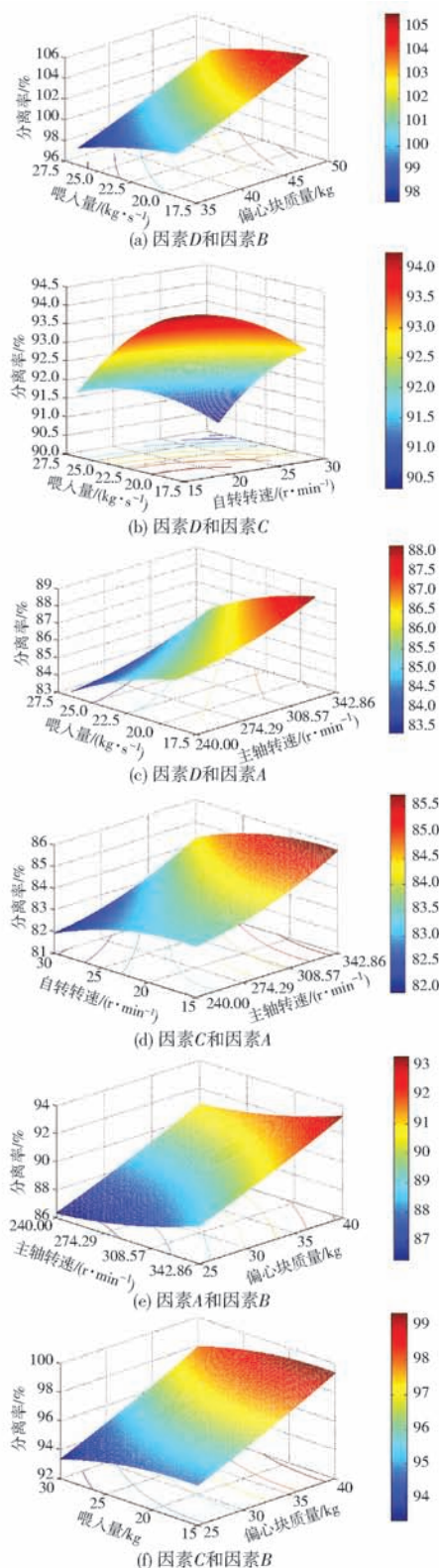


图5 多因子效应对分离率 η_1 的影响响应曲面

Fig.5 Response surface of multi-factor effect on the fruit separation rate η_1

滚筒自转转速对果实分离率影响较显著;从等高线可以看出当滚筒自转转速在 20 r/min 左右时,激振器主轴转速在 310 ~ 350 r/min 时,果实分离率最优。

图 5e 为滚筒自转转速 C 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 A (激振器主轴转速) 和因

素 B (偏心块质量) 对果实分离率 η_1 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出曲面变化陡峭,激振器主轴转速和偏心块质量对果实分离率的影响较显著;从等高线可以看出当偏心块质量和激振器主轴转速同取大值时,果实的分离率较高。

图 5f 为激振器主轴转速 A 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 B (偏心块质量) 和因素 C (滚筒自转转速) 对果实分离率 η_1 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出曲面变化陡峭,滚筒自转转速和偏心块质量对果实分离率的影响较显著;从等高线可以看出当滚筒自转转速为 20 r/min 左右时,偏心块质量取大值时,果实的分离率较高。

2.2.2 各试验因素对果实破损率的影响分析

图 6a 为激振器主轴转速 A 和滚筒自转转速 C 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 B (偏心块质量) 对果实破损率 η_2 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看到相对于喂入量,偏心块质量的变化对果实破损率的影响更显著;从等高线可以看出,喂入量为 22.5 kg/s 左右,偏心块质量取 35 kg 左右时,果实的破损率最低。

图 6b 为激振器主轴转速 A 和偏心块质量 B 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 C (滚筒自转转速) 对果实破损率 η_2 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出随滚筒自转转速的增加,果实破损率降低;而喂入量对果实破损率的影响不够显著;从等高线可以看出当喂入量取 22.5 kg/s 左右,滚筒自转转速取小值时,果实的破损率最低。

图 6c 为偏心块质量 B 和滚筒自转转速 C 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 A (激振器主轴转速) 对果实破损率 η_2 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出曲面变化陡峭,喂入量和激振器主轴转速对果实破损率的影响较显著;从等高线可以看出激振器主轴转速取 270 r/min 左右时,果实的破损率较低。

图 6d 为偏心块质量 B 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 A (激振器自转转速) 和因素 C (滚筒自转转速) 对果实破损率 η_2 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出当激振器主轴转速增大时,果实破损率先是缓慢减小再缓慢增大;从等高线可以看出当滚筒自转转速在 280 r/min 以上,激振器主轴转速在 270 r/min 左右时,果实的破损率较小。

图 6e 为滚筒自转转速 C 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 A (激振器主轴转速) 和因素 B (偏心块质量) 对果实破损率 η_2 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出曲面变化平缓,激振器

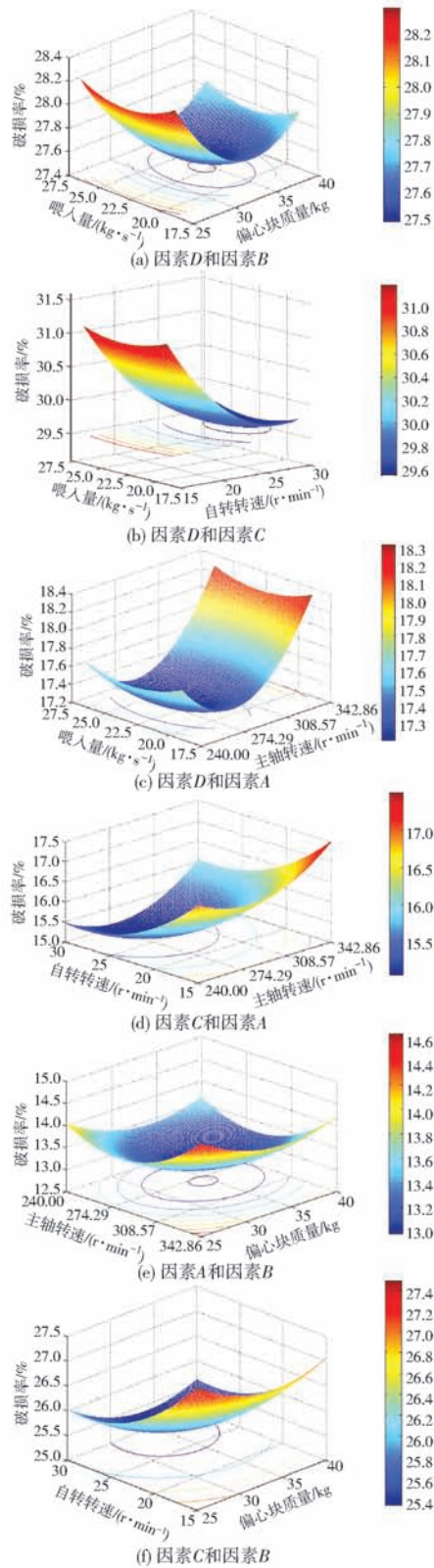


图 6 多因子效应对破损率 η_2 的影响响应曲面
Fig.6 Response surface of multi factor effect on the breakage rate η_2

主轴转速和偏心块质量对果实破损率的影响显著程度近似;从等高线可以看出当偏心块质量在 34 kg 左右时,激振器主轴转速在 280 r/min 左右时,果实的破损率最低。

图 6f 为激振器主轴转速 A 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 B (偏心块质量) 和因素 C (滚筒自转转速) 对果实破损率 η_2 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出滚筒自转转速相比偏心块质量对果实分离率的影响显著;从等高线可以看出当滚筒自转转速取 24 r/min 以上时,偏心块质量取 35 kg 左右时,果实的破损率最小。

2.2.3 各试验因素对含杂率的影响分析

图 7a 为激振器主轴转速 A 和滚筒自转转速 C 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 B (偏心块质量) 对含杂率 η_3 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出喂入量较偏心块质量对含杂率的影响显著;从等高线可以看出,当喂入量取小值,偏心块质量取小值时,含杂率较低。

图 7b 为激振器主轴转速 A 和偏心块质量 B 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 C (滚筒自转转速) 对含杂率 η_3 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出随滚筒自转转速的增加,破损率先降低后增大;而随喂入量的增加,含杂率逐渐增大;从等高线可以看出当喂入量取小值时,滚筒自转转速取 23 r/min 左右时,含杂率较低。

图 7c 为偏心块质量 B 和滚筒自转转速 C 在回归模型方程中取值为零时因素 D (喂入量) 和因素 A (激振器主轴转速) 对含杂率 η_3 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出曲面变化陡峭,说明喂入量和激振器主轴转速对含杂率的影响显著;从等高线可以看出当喂入量取小值时,激振器主轴转速取小值时,含杂率最低。

图 7d 为偏心块质量 B 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 A (激振器自转转速) 和因素 C (滚筒自转转速) 对含杂率 η_3 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出曲面变化陡峭,说明滚筒自转转速和激振器主轴转速对含杂率影响较显著;从等高线可以看出当滚筒自转转速在 22.5 r/min 时,激振器主轴转速在 270 r/min 时,含杂率最低。

图 7e 为滚筒自转转速 C 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 A (激振器主轴转速) 和因素 B (偏心块质量) 对含杂率 η_3 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出当激振器主轴转速增大时,含杂率增大;而偏心块质量的变化对含杂率影响不显著;从等高线可以看出激振器主轴转速为小值时,含杂率较低。

图 7f 为激振器主轴转速 A 和喂入量 D 在回归模型方程中取值为零时因素 B (偏心块质量) 和因素 C (滚筒自转转速) 对含杂率 η_3 的影响曲面图和等高线图,从图中可以看出当滚筒自转转速增加时,

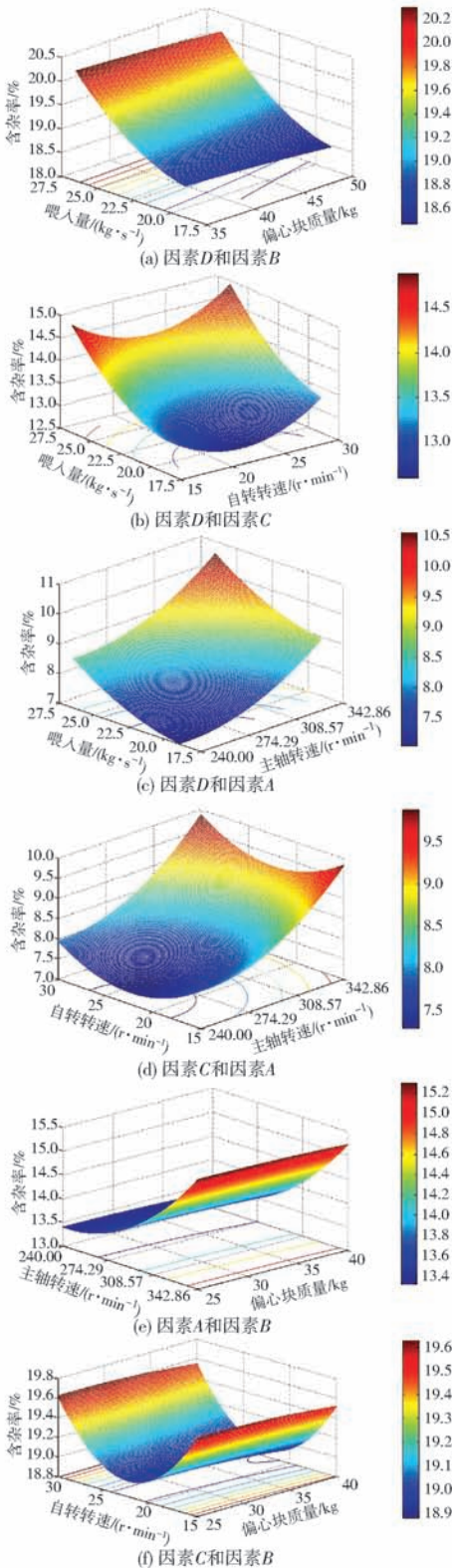


图 7 多因子效应对含杂率 η_3 的影响响应曲面
Fig. 7 Response surface of multi factor effect on the impurity rate η_3

含杂率先降低后增大;而偏心块质量的变化对含杂率影响不够显著;从等高线可以看出当滚筒自转转速取小值时,含杂率较低。

2.3 试验因子对试验指标影响的优化求解

结合试验数据回归模型和试验因子效应对试验

指标的影响分析,根据番茄收获经验和相关番茄收获标准要求确定各试验指标的重要性由大到小为:果实分离率、果实破损率、果实含杂率,各指标在综合评分时加权系数设定为:0.5、0.4、0.1。在 Matlab 软件里建立试验因子与试验指标间的优化数学模型,对试验指标进行优化计算。

综合指标函数表达式

$$y = 62.85546 + 0.00896x_1^2 - 0.65355x_1 + 0.00435x_2^2 - 0.14028x_2 + 0.00089x_3^2 - 0.12656x_3 - 0.00126x_4^2 + 0.04216x_4 \quad (4)$$

转换为最小函数表达式

$$\min f = 24.91836 + 0.00206x_1^2 - 0.22665x_1 + 0.00165x_2^2 - 0.27048x_2 + 0.00839x_3^2 - 0.36696x_3 + 0.00404x_4^2 - 0.27554x_4 \quad (5)$$

考虑试验范围内试验因子的水平范围,则函数约束条件为

$$\text{s. t.} \begin{cases} 35 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 50 \text{ r/min} \\ 25 \text{ kg} \leq x_2 \leq 40 \text{ kg} \\ 15 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 30 \text{ r/min} \\ 19 \text{ kg/s} \leq x_4 \leq 26.5 \text{ kg/s} \end{cases}$$

采用求解多变量有约束非线性函数最值问题的 minf 函数进行优化目标函数求解。得到输出结果分别为: $x_1 = 50.0000 \text{ r/min}$, $x_2 = 40.0000 \text{ kg}$, $x_3 = 21.8689 \text{ r/min}$, $x_4 = 19.0000 \text{ kg/s}$, $\min f = 1.9074$ 。

从求解结果可以看出,在试验取值范围内,激振器主轴转速取 342.86 r/min,偏心块质量为 40 kg,自转转速为 21.8689 r/min,喂入量为 19 kg/s,3 个指标的综合系数为 1.9074,优化效果显著。同时,试验理论优化结果和理论设计参数优选值(激振器主轴转速 350 r/min、偏心块质量 40 kg)非常接近,因此,进一步验证了理论分析的正确性。

2.4 最优因子方案重复性试验验证

为了更进一步验证最优因子组合方案的作业效果,对优化结果进行重复性试验验证。试验重复 3 次,以保证试验的可靠性。试验因子水平取整处理,试验数据和结果如表 6 所示。

同时,为验证模型的正确性,对试验数据和预测

表 6 最优因子组合方案重复性试验结果

Tab. 6 Results of repeated test of optimal factor combination scheme							
试验 编号	试验因子				试验指标		
	x_1	x_2	x_3	x_4	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$	$\eta_3/\%$
1	50	40	22	19	98.8	2.8	3.6
2	50	40	22	19	98.4	3.2	4.1
3	50	40	22	19	97.9	4.1	4.8
均值	50	40	22	19	98.37	3.37	4.17

模型方程预测值进行对比,如表 7 所示。

表 7 最优因子组合方案预测值和实测值对比
Tab.7 Comparison between predicted and measured values of optimal factor combination %

响应变量	预测值	试验值	相对误差
果实分离率 η_1	99.44	98.33	1.13
果实破损率 η_2	3.23	3.37	4.15
含杂率 η_3	3.39	4.17	18.70

从表 7 中可以看出,在最优因子组合方案下:激振器主轴转速 342.86 r/min、偏心块质量 40 kg、滚筒自转转速 22 r/min、喂入量 19 kg/s 时,所得试验结果较好,预测模型和试验的果实分离率和果实破损率的相对误差都小于 5%,因此可信;但含杂率的相对误差为 18.7%,误差较大,在实际生产中,番茄果秧分离后有部分枝叶杂质在随果实输送的过程中,通过栅格带漏到田地里,或是被风机吹出,所以含杂率相对于果实分离率和果实破损率影响较小,因此认为预测模型可信。在最优试验因子组合下,双动力回转振动式果秧分离试验效果能够达到 NY/T

1824—2009 番茄收获机作业质量要求中对分离效果的相关要求。

3 结论

(1)综合试验台设计参数和操作经验,运用正交试验设计表 $L_{16}(4^5)$,试验设计 4 因素 4 水平正交试验。

(2)运用多元回归分析方法对试验结果进行分析,基于试验因素建立果实分离率、破损率、含杂率的预测模型,并运用决定系数 R^2 、 P 值、残差的方差 S^2 等分析了预测模型的可信性。

(3)基于响应曲面分析法分析试验因素对果实分离率、破损率、含杂率的影响,并确定各指标的加权因子,得到优化模型,最终确定最佳参数组合为:激振器主轴转速为 342.86 r/min,偏心块质量为 40 kg,自转转速为 22 r/min,植株喂入量为 19 kg/s;并重复性试验验证,果实分离率、破损率和含杂率分别为 98.33%、3.37% 和 4.17%,能够满足收获作业质量要求。

参 考 文 献

1 梁勤安,余庆辉,冯斌,等.新疆加工番茄机械化收获发展对策的研究[J].新疆农业科学,2007,44(2):225-230.
LIANG Qin'an, YU Qinghui, FENG Bin, et al. Exploration on countermeasures of developing mechanization harvest of processing tomato in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2007, 44(2): 225-230. (in Chinese)

2 王俊,杜冬冬,胡金冰,等.蔬菜机械化收获技术及其发展[J].农业机械学报,2014,45(2):81-87.
WANG Jun, DU Dongdong, HU Jinbing, et al. Vegetable mechanized harvesting technology and its development[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 81-87. (in Chinese)

3 周军平,郝朝会,杨学军,等.番茄收获机喂入机构运动特性分析与参数优化[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):75-85.
ZHOU Junping, HAO Zhaohui, YANG Xuejun, et al. Motion characteristics analysis and parameter optimization for tomato harvester feed mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 75-85. (in Chinese)

4 王丽红,梁荣庆,秦经伟,等.加工番茄果秧分离参数优化及验证[J].农业工程学报,2015,31(5):23-28.
WANG Lihong, LIANG Rongqing, QIN Jingwei, et al. Parameters' optimization and verification for processing tomato fruit-seedling separation [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 23-28. (in Chinese)

5 BARRIOS-MASIAS Felipe H, JACKSON Louise E. California processing tomatoes: morphological, physiological and phenological traits associated with crop improvement during the last 80 years [J]. European Journal of Agronomy, 2014, 53(2): 45-55.

6 FMC Italia S. P. A. Tomato harvester with improved plant handing devices: US, 6298644[P]. 2001-10-09.

7 Westside Equipment Company. Small scale tomato harvester: US, 7921628[P]. 2011-04-12.

8 李成松,坎杂,谭洪洋,等.加工番茄果秧分离装置运动过程分析[J].农业机械学报,2012,43(4):66-69.
LI Chengsong, KAN Za, TAN Hongyang, et al. Movement process analysis on processing tomato fruit separation device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 66-69. (in Chinese)

9 毕新胜,肖彬彬,张进,等.加工番茄回转滚筒式果秧分离机构参数正交试验优化[J].农业机械学报,2012,43(8):94-98.
BI Xinsheng, XIAO Binbin, ZHANG Jin, et al. Orthogonal experiment optimization of parameters of rotary roller-type fruit-vine separation mechanism for processing tomato [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 94-98. (in Chinese)

10 黄国伟,毕新胜,肖彬彬,等.番茄果实与茎秆分离力的影响因素分析[J].食品与机械,2013,29(3):187-190.
HUANG Guowei, BI Xinsheng, XIAO Binbin, et al. Analysis of influence factors about separation force between tomato fruit and stalk[J]. Food & Machinery, 2013, 29(3): 187-190. (in Chinese)

11 李成松,坎杂,谭洪洋,等.4FZ-30型自走式番茄收获机的研制[J].农业工程学报,2012,28(10):20-26.
LI Chengsong, KAN Za, TAN Hongyang, et al. Development of 4FZ-30 self-propelled tomato harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 20-26. (in Chinese)

- 2007, 17(2):235-245.
- 7 杨金燕,杨肖娥,何振立,等. 土壤中铅的吸附-解吸行为研究进展[J]. 生态环境,2005,14(1):102-107.
YANG Jinyan,YANG Xiaoe,HE Zhenli,et al. Advance in the studies of Pb absorption and desorption in soil[J]. Ecology and Environment,2005,14(1):102-107. (in Chinese)
- 8 常夏源,童仁军,司友斌,等. 某再生铅工业园区周边土壤中铅和镉的生物可给性及其对人体的健康风险评价[J]. 安徽农业大学学报,2014,41(6):1055-1060.
CHANG Xiayuan,TONG Renjun,SI Youbin,et al. Bioaccessibility and risk assessment to human health of lead and cadmium in the soil around recycled lead industrial park[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2014,41(6):1055-1060. (in Chinese)
- 9 崔岩山,陈晓晨,付瑾. 污染土壤中铅、砷的生物可给性研究进展[J]. 生态环境学报,2010,19(2):480-486.
CUI Yanshan,CHEN Xiaochen,FU Jin. Progress in study of bioaccessibility of lead and arsenic in contaminated soils[J]. Ecology and Environmental Sciences,2010,19(2):480-486. (in Chinese)
- 10 周姣花,钟莅湘,来克冰,等. 原子荧光光谱法测定土壤中的锗[J]. 黄金,2010,31(7):53-55.
ZHOU Jiaohua,ZHONG Lixiang,LAI Keping,et al. Determination of Germanium in soil and stream sediment samples by atomic fluorescence spectrometry[J]. GOLD,2010,31(7):53-55. (in Chinese)
- 11 吕彩云. 重金属检测方法研究综述[J]. 资源开发与市场,2008,24(10):887-890.
LÜ Caiyun. Review on the detection methods of heavy metals[J]. Resource Development & Market,2008,24(10):887-890. (in Chinese)
- 12 LEE Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology [M]. Beijing:National Defense Industry Press,2012:2-3.
- 13 LI Jiusheng, ZHAO Xiaoli, LI Jianrui. Study on the THz spectra of metallic ion in soil [J]. International Symposium on Photo Electronic Detection and Imaging 2009: Terahertz and High Energy Radiation Detection Technologies and Applications, 2009, 7385:1-6.
- 14 李斌,赵春江. 我国当前农产品产地土壤重金属污染形势及检测技术分析[J]. 农业资源与环境学报,2013,30(5):1-7.
LI Bin,ZHAO Chunjiang. Current situation of heavy metals pollution in soil at farmland and detection technologies analysis in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2013,30(5):1-7. (in Chinese)
- 15 GB 15618—2008 土壤环境质量标准[S]. 2008.
- 16 王菊香,韩晓,刘洁. 组合区间偏最小二乘法结合红外光谱法测定在用润滑油的运动粘度[J]. 理化检验:化学分册,2015,51(5):639-641.
WANG Juxiang,HAN Xiao,LIU Jie. Rapid determination of dynamic viscosity in used lubricating oil by BiPLS with IR[J]. PTCA Part B: Chem. Anal.,2015,51(5):639-641. (in Chinese)
- 17 王志美,陈传仁. 遗传算法理论及其应用发展[J]. 内蒙古石油化工,2006(9):44-45.
WANG Zhimei,CHEN Chuanren. Genetic algorithm theory and application development[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry,2006(9):44-45. (in Chinese)

(上接第248页)

- 12 现代农装科技股份有限公司. 一种果秧分离装置及具有该装置的番茄收获机:中国,201320807480.3[P]. 2014-06-11.
- 13 李智国. 基于番茄生物力学特性的采摘机器人抓取损伤研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
LI Zhiguo. Study on the grasp damage of harvesting robot based on the biomechanical properties of tomato fruits[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2011. (in Chinese)
- 14 李智国,刘继展,李萍萍. 机器人采摘中番茄力学特性与机械损伤的关系[J]. 农业工程学报,2010,26(5):112-116.
LI Zhiguo, LIU Jizhan, LI Pingping. Relationship between mechanical property and damage of tomato during robot harvesting [J]. Transactions of the CASE,2010,26(5):112-116. (in Chinese)
- 15 刘继展,李萍萍,李智国,等. 面向机器人采摘的番茄力学特性试验[J]. 农业工程学报,2008,24(12):66-70.
LIU Jizhan, LI Pingping, LI Zhiguo,et al. Experimental study on mechanical properties of tomatoes for robotic harvesting [J]. Transactions of the CSAE,2008,24(12):66-70. (in Chinese)
- 16 韩泽群,姜波. 加工番茄品种多性状综合评价方法研究[J]. 中国农业科学,2014,47(2):357-365.
HAN Zequn,JIANG Bo. A study on comprehensive evaluation of the processing tomato varieties multiple traits [J]. Scientia Agricultura Sinica,2014,47(2):357-365. (in Chinese)
- 17 岳绚丽. 加工番茄滴灌栽培的机械采收技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2007.
YUE Xuanli. The research of mechcal harvesting technology with drip irrigation on processing tomatoes[D]. Yangling:Northwest A&F University,2007. (in Chinese)