

基于鲟鱼头部曲线的植保分禾吊杆组合装置设计与试验

孙文峰¹ 刘海洋¹ 付天鹏¹ 何跃¹ 王润涛² 王福林¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 岭南师范学院信息工程学院, 湛江 524048)

摘要: 针对作物生长中后期进行植保作业时茎叶背面及植株中、下部雾滴沉积较差的问题,以鲟鱼头部曲线为仿生原型,进行了植保仿生分禾与吊杆组合施药装置设计与试验。基于仿生构建提取了鲟鱼头部轮廓曲线,实现分禾叶片结构仿生,并分析了茎叶减伤机理,通过理论分析建立茎秆弯曲和回弹数学模型,确定了分禾叶片宽度、喷头距分禾叶片尾端距离等关键结构参数。运用 ADAMS 仿真软件模拟分禾叶片与茎秆的接触全过程,检验仿生分禾叶片相对于原型圆弧分禾叶片的降阻减伤效果。通过正交旋转组合试验探讨结构及工作参数对行进阻力及雾滴沉积度的影响规律,采用蚁群算法对数学回归模型进行多目标优化,获得 Pareto 最优解集,确定最佳参数组合为行进速度 7.0 km/h、倾斜角 16°、距地高度 155 mm,在此参数组合下行进阻力 38.7 N,平均雾滴沉积度 31.5 个/cm²。田间性能试验表明,试验结果与优化结果误差较小;与传统施药方式相比,仿生植保分禾与吊杆组合装置能够显著改善雾滴在植株中、下部的沉积情况,其变异系数为 5.3%;与现有原型圆弧分禾装置相比,仿生分禾装置可使雾滴沉积度提高 13.6%、前进阻力降低 20.7%,行进阻力变化趋势与仿真结果误差较小。

关键词: 植保机械; 仿生; 分禾; 试验; 雾滴沉积

中图分类号: S49; TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)01-0049-13

OSID:



Design and Experiment of Plant Protection Opener Suspender
Combination Device Based on Sturgeon Head Curve

SUN Wenfeng¹ LIU Haiyang¹ FU Tianpeng¹ HE Yue¹ WANG Runtao² WANG Fulin¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. School of Information Engineering, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor droplet deposition on the back of the stems and leaves and the middle and lower parts of the plants during plant protection operations in the middle and late stages of crop growth, the sturgeon head curve was used as a bionic prototype to design and test a plant protection bionic cropping and hanging rod combined pesticide application device. Based on the bionic construction to extract the head contour curve of the sturgeon, realize the bionics of the opener blade, analyze the damage reduction mechanism of the stem and leaf, and establish the mathematical model of the stem bending and rebound through theoretical analysis to determine the width of the opener blade and the distance between the nozzles. Key structural parameters such as the distance from the tail end of the opener blade were obtained. The ADAMS simulation software was used to simulate the whole process of the contact between the opener blade and the stems, and the effect of the bionic opener blade on reducing drag and injury compared with the prototype blades was tested. Through orthogonal rotating combination experiments, the influence degree and law of structure and working parameters on traveling resistance and droplet deposition degree were discussed, and the mathematical regression model was optimized by using ant colony algorithm to obtain the Pareto optimal solution set and determine the best parameter combination, which was as follows: the traveling speed was 7.0 km/h, the inclination angle was 16°, and the height was 155 mm from the ground. Under these parameter combination, the traveling resistance was 38.7 N, and the average droplet deposition degree was 31.5/cm². The results were verified by field performance experiments, and the error between experiments and optimization was small; compared with

收稿日期: 2020-10-22 修回日期: 2020-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD020100408, 2018YFD020080709)

作者简介: 孙文峰(1973—),男,研究员,主要从事高效植保机械研究, E-mail: 13304508203@163.com

通信作者: 王福林(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事农业系统工程与管理工程研究, E-mail: fulinwang1462@163.com

the traditional method of pesticide application, the bionic plant protection opener and suspender combination device can significantly improve the deposition of fog droplets in the middle and lower parts of the plant, with a coefficient of variation of 5.3%; compared with the existing prototype the bionic opener device can increase the degree of droplet deposition by 13.6%, reduce the forward resistance by 20.7%, and had a smaller error between the trend of the movement resistance and the simulation result. This research provided design reference for the development of high-efficiency pesticide application technology for stems and leaves.

Key words: plant protection machinery; bionic; opener; experiment; droplet deposition

0 引言

农作物病虫草害防治是人类农业生产中最普遍的一项农事活动,而施用农药是病虫草害防治中最为快速、经济、有效的手段^[1-2]。在农作物生长中后期,密植作物或枝叶茂盛植株的雾滴沉积一直是困扰植保行业的难题。吊喷杆施药可以有效解决这一问题,但茎叶损伤大、适用性低、工作状态易受茎叶干扰,制约了施药技术发展^[3-4]。因此,设计一种能够有效降阻减伤并提升施药效果的分禾装置,对提高植保作业效率及质量具有重要的现实意义。

国外针对分禾装置的研究主要以病虫草害的防治为目标。ZHU 等^[5]设计了一种用于防治大豆锈病的分禾器,采用一硬质横梁布置在喷头前,使大豆植株弯曲后进行施药;MOURA 等^[6]采用多个刚链组成链幕,用来提高药液在植株中下部的沉积度;PRADO 等^[7]在文献[5]的基础上进行了改进,在横梁两端采用轴承座进行装配,能够有效减轻茎叶损伤。以上几种装置能够有效改善作物的纵向雾滴沉积,但要提高植株下部的雾滴沉积,则会造成茎叶损伤增大。崔龙飞等^[8]利用 EBF 神经网络逼近试验和响应因素之间的数学模型,得到了针对于棉花作物植保分禾器的最佳试验参数;李瑞敏^[9]利用 ADAMS 软件建立了植保分禾器与玉米茎秆作用的仿真模型,并通过模拟得出茎秆极限位置下分禾器的作业参数;潘佛雏^[10]针对于新疆棉花的物理特性设计了抛物线型分禾器,经试验得出,行进速度越快,分禾器所受压力越大。目前,关于植保分禾装置的研究多集中于通过试验方法确定其工作参数,其结构设计均缺少理论依据^[11-12]。植保分禾装置结构设计不合理会造成雾滴沉积率低、伤苗率高、机组能耗大等问题。近年来,仿生学在农业上的应用越来越受到重视^[13-15]。

本文基于仿生学原理,兼顾植保分禾装置作业原理和鲟鱼的低阻行进能力,通过仿生设计、理论分析、试验分析及优化等方法设计仿生植保分禾装置,分析该装置的结构及工作参数对行进阻力及雾滴沉积度的影响规律,以期高性能植保机械仿生分禾

器提供设计及理论依据。

1 仿生植保分禾装置结构与工作原理

1.1 生物原型分析

鲟鱼拥有细长的纺锤状且符合流体动力学的流线型身体^[16],如图1所示,其运动过程中能够获得较低的阻力,与其头部流线型曲线密不可分,这为流体内部运动和流体机械的仿生设计提供了参考。根据文献[17-18]可将与植保分禾装置作用的植株视为流体,这与鲟鱼的生存环境相似,故以鲟鱼头部曲线作为仿生原型,设计了仿生植保分禾装置。



图1 鲟鱼

Fig.1 Sturgeon

1.2 结构与工作原理

仿生植保分禾装置安装在喷杆式喷雾机桁架上,整体装置由上仿生分禾叶片、下仿生分禾叶片、支撑弹簧、吊喷杆等组成。

如图2所示,装置通过快速连接机构与桁架相连,上仿生分禾叶片装配在下仿生分禾叶片外部,通过固定滑道可以实现纵向高度调节以适应不同作物的不同生长期;为避免分禾装置在高速运动时或茎叶茂盛情况下造成壅积,在分禾器内部支撑部件间配装有支撑弹簧,分禾装置前进阻力过大时能够被动调整角,使茎秆在分禾叶片表面划过;喷头与吊喷杆交错排列,喷头位于植株上方,吊喷杆在植株行间运动,作物在上仿生分禾叶片、下仿生分禾叶片的作用下分向两侧,为吊喷杆创造良好的施药空间。

2 仿生植保分禾装置设计

2.1 仿生信息提取及方程建立

分禾叶片为与茎秆接触的主要工作部件,是本装置核心部分,因此主要对分禾叶片进行仿生改进设计。为精准获取鲟鱼头部轮廓特征,基于逆向工程原理,在不破坏鲟鱼物理特征的前提下使其正常死亡,利用杭州思看科技公司生产的 ScanTech

HSCAN331 型手持式激光三维扫描仪扫描,其精度为 0.03 mm,信息提取过程如图 3 所示。经扫描创建网格后,得到鲟鱼点云数据,将采集的点云数据导入 Geomagic Stuio 2014 软件中,对优化后的点云数据进行封装和填孔后得到鲟鱼模型,如图 4 所示。

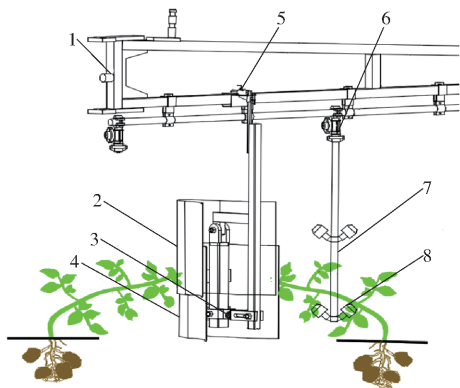


图 2 仿生植保分禾装置结构示意图

Fig. 2 Schematic of bionic plant protection opener device structure

1. 喷雾机桁架 2. 上仿生分禾叶片 3. 支撑弹簧 4. 下仿生分禾叶片 5. 快速连接机构 6. 喷头体 7. 吊喷杆 8. 锥形喷嘴



图 3 鲟鱼头部轮廓取样扫描

Fig. 3 Sturgeon head profile sampling scan



(a) 点云图

(b) 鲟鱼模型

图 4 鲟鱼点云图与模型

Fig. 4 Point cloud and model of sturgeon

为确定鲟鱼头部结构参数,对鲟鱼头部轮廓曲线进行提取。首先,将鲟鱼模型导入 SolidWorks 软件中,根据文献[19-21]所采用方法获取了鲟鱼的三维模型,利用 AutoCAD 获取模型头部曲线二维点的坐标,调用 Matlab 软件的 cftool 函数,得到鲟鱼头部拟合曲线如图 5 所示,则鲟鱼头部拟合方程为

$$h = \frac{21.28z^2 - 23.62z + 61.44}{z^2 - 2.486z + 2.905} \quad (R^2 = 0.9988) \quad (1)$$

式中 h ——鲟鱼头部纵剖面轮廓垂直高度,mm
 z ——鲟鱼头部纵剖面轮廓水平长度,mm

2.2 减阻减伤机理分析

为进一步探究仿生植保分禾装置对茎叶的减伤机理,以基于上文所提取鲟鱼头部曲线的仿生植保分禾叶片和现有的原型圆弧分禾叶片为例,以两种分禾叶片表面轮廓曲线为作用曲面,分别对植株进行力学分析,如图 6 所示。

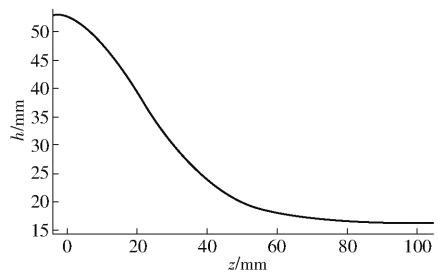
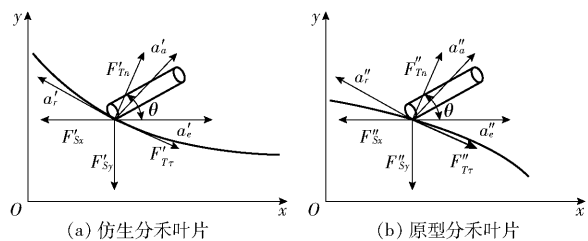


图 5 鲟鱼头部轮廓拟合曲线

Fig. 5 Sturgeon head contour fitting curve



(a) 仿生分禾叶片

(b) 原型分禾叶片

图 6 分禾叶片与茎秆作用力学对比分析

Fig. 6 Comparative analysis of action mechanics of opener blade and stems

以仿生分禾叶片与茎秆作用为例,将茎秆与分禾叶片的接触点视为质点作为分析对象,对其进行质点动力学分析^[22]。由于茎秆在铅垂平面受力平衡,故不必分析,当茎秆接触分禾叶片时,会在分禾叶片作用下产生弯曲并发生滑切,此时茎秆质点运动方程为

$$\begin{cases} F'_{Tn} - F'_{Sx} \cos \theta - F'_{Sy} \sin \theta = ma'_e \cos \theta \\ F'_{Tr} - F'_{Sx} \sin \theta + F'_{Sy} \cos \theta = ma'_e \sin \theta - ma'_r \end{cases} \quad (2)$$

式中 F'_{Tn} ——质点受到仿生分禾叶片所给的支持力,N

F'_{Tr} ——质点受到仿生分禾叶片所给的摩擦力,N

F'_{Sx} ——仿生分禾叶片作用下质点受到茎秆由于弯曲产生弹力沿 x 方向分力,N

F'_{Sy} ——仿生分禾叶片作用下质点受到茎秆由于弯曲产生弹力沿 y 方向分力,N

m ——质量,kg

a'_e ——质点牵连加速度, m/s^2

a'_r ——质点相对加速度, m/s^2

θ ——支持力与牵连加速度夹角, $(^\circ)$

由分禾装置工作原理可知,茎秆与分禾叶片接触点在其工作过程中与分禾叶片之间存在相对运动,因此在两者之间会产生滑动摩擦力,由工程力学^[23]可知,滑动摩擦与正压力呈线性关系,一般关系式为

$$F'_{Tr} = \mu F'_{Tn} \quad (3)$$

式中 μ ——茎秆与分禾叶片间摩擦因数

联立式(2)、(3)可得

$$F'_{Tn}(\tan\theta - \mu) - F'_{Sy}(\cos\theta - \sin\theta\tan\theta) = ma'_r \quad (4)$$

由于植株根部与大地间连接可视为固定约束,故简化成悬臂梁模型^[24],由梁弯曲微分方程可知^[25]

$$F'_{Sy} = \frac{\varepsilon I}{r_1} \frac{d^2 y_1}{dx^2} \quad (5)$$

式中 ε ——茎秆弹性模量, Pa

I ——茎秆截面惯性矩, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

r_1 ——仿生分禾叶片作用力臂, m

y_1 ——仿生分禾叶片作用下茎秆在 x 处的挠度, m

同理可得

$$F''_{Sy} = \frac{\varepsilon I}{r_2} \frac{d^2 y_2}{dx^2} \quad (6)$$

式中 r_2 ——原型圆弧分禾叶片作用力臂, m

y_2 ——原型圆弧分禾叶片作用下茎秆在 x 处的挠度, m

F''_{Sy} ——原型圆弧分禾叶片作用下质点受到茎秆由于弯曲产生弹力沿 y 方向分力, N

联立式(4)、(5)易知,分禾叶片作用在茎秆上支持力受挠度、支持力与牵连加速度夹角 θ 影响。利用 AutoCAD 分析可知,在茎秆与两种分禾叶片接触全过程中,角变化范围差别不大,因此当茎秆在两种分禾叶片作用下所产生的相对运动一致时,由于仿生分禾叶片独特的结构轮廓曲线,使 $y_1 < y_2$,即茎秆在仿生分禾叶片作用下所产生挠度小于在原型圆弧分禾叶片作用下所产生挠度,故可得 $F'_{Sy} < F''_{Sy}$,因此在取得相同作用效果下,仿生分禾叶片行进阻力将小于原型圆弧分禾叶片,故仿生分禾叶片将会对茎叶具有减伤作用。

2.3 茎秆弯曲动力学建模

当分禾叶片接触茎秆后,茎秆会产生弯曲变形。为准确描述茎秆弯曲及回弹过程,进而确定分禾器相关尺寸关键参数,需建立茎秆弯曲动力学模型,参考相关研究^[26],茎秆可视为均质圆梁。在兼顾建模过程的简易化及合理性的同时,以茎秆作用俯视图为模型建立基准面,茎秆在分禾叶片作用下弯曲示意如图7所示。

2.3.1 水平分力作用下垂直挠度

分禾器在拖拉机带动下以速度 v 行进,茎秆与分禾叶片作用位置可分为初始接触位置 A 和分离位置 B 。茎秆在分禾叶片所给的支持力 F_T 作用下发生弯曲,其可分为水平弯曲挠度和垂直弯曲挠度,根据 ZHU 等^[5]的研究,水平挠度并不影响茎秆回弹受药特性,因此本文只研究垂直挠度 y_m 对茎秆回弹

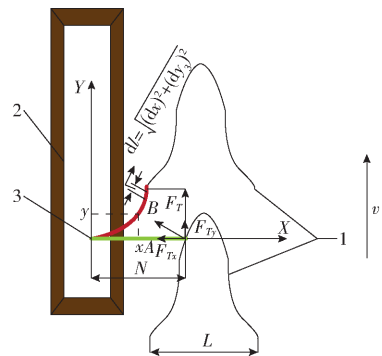


图7 茎秆弯曲过程分析

Fig.7 Analysis of curving process of stem

1. 仿生分禾叶片 2. 耕作垄台 3. 马铃薯植株茎秆

受药的影响。茎秆总垂直挠度 y_m 由支持力 F_T 的水平分力 F_{Tx} 所产生的垂直挠度 y_{mx} 与支持力 F_T 的垂直分力 F_{Ty} 所产生的垂直挠度 y_{my} 累加而得。茎秆在距离根部 x 处受支持力 F_T 的水平分力 F_{Tx} 作用所产生的垂直挠度为

$$y_3 = y_{mx} - \frac{\varepsilon I}{F_{Tx}} \frac{d^2 y_3}{dx^2} \quad (7)$$

式中 y_3 ——水平分力作用下垂直挠度, m

求解微分方程可知其通解为

$$y_3 = y_{mx} - c_1 \sin\left(\sqrt{\frac{F_{Tx}}{\varepsilon I}} x\right) + c_2 \cos\left(\sqrt{\frac{F_{Tx}}{\varepsilon I}} x\right) \quad (8)$$

式中 c_1, c_2 ——未知常量

由分禾器工作原理可知,对于植株根部 $x = 0$, $y = 0$, $\frac{dy}{dx} = 0$ 。则方程的解为

$$y_3 = y_{mx} \left(1 - \cos\left(\sqrt{\frac{F_{Tx}}{\varepsilon I}} x\right)\right) \quad (9)$$

当 $x = N - b$ 时, $y_3 = y_{mx}$ 。则式(9)为

$$\sqrt{\frac{F_{Tx}}{\varepsilon I}} = \frac{\pi}{2(N - b)} \quad (10)$$

式中 N ——茎秆长度, m

b ——分禾叶片对茎秆扰动深度, m

联立式(9)、(10)可得茎秆任意处垂直挠度为

$$y_3 = y_{mx} \left[1 - \cos \frac{\pi x}{2(N - b)}\right] \quad (11)$$

式(11)仍无法表示茎秆在 B 处垂直挠度与分禾叶片作用扰动深度之间关系,因此引入茎秆长度微元,即

$$dl = \sqrt{(dx)^2 + (dy_3)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy_3}{dx}\right)^2} dx \quad (12)$$

式中 l ——微元条件下茎秆长度, m

由式(11)可知

$$\frac{dy_3}{dx} = \frac{\pi y_{mx}}{2(N - b)} \sin \frac{\pi x}{2(N - b)} \quad (13)$$

联立式(12)、(13)可知

$$l = \int_0^{N-b} \sqrt{1 + \left[\frac{\pi y_m}{2(N-b)} \sin \frac{\pi x}{2(N-b)} \right]^2} dx \quad (14)$$

由式(14)形式可知,其符合第二类不完全椭圆积分的基本形式^[27]。将式(14)积分可得

$$l = \frac{y_{mx}}{K} E \left[\frac{\pi}{2}, j \right] \quad (15)$$

$$j = \frac{y_{mx} \pi}{\sqrt{4(N-b)^2 + y_{mx}^2 \pi^2}} \quad (0 \leq j \leq 1) \quad (16)$$

式(15)中 $E \left[\frac{\pi}{2}, j \right]$ 可通过椭圆积分表^[28]查询得知,其中 j 为偏心率,因茎秆弯曲过程中,总长度保持不变,故有

$$N = l = \frac{y_{mx}}{K} E \left[\frac{\pi}{2}, j \right] \quad (17)$$

经上述分析易知,引入变量 j 后,可明确茎秆在位置 B 受 F_{Tx} 作用最大垂直挠度 y_{mx} 与分禾叶片作用扰动深度 b 之间数学模型为

$$y_{mx} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\left(\frac{Nj}{E \left[\frac{\pi}{2}, j \right]} \right)^2 - 4(N-b)^2} \quad (18)$$

2.3.2 垂直分力作用下垂直挠度

茎秆在距离根部 x 处受支持力 F_T 的垂直分力 F_{Ty} 作用所产生的垂直挠曲线方程为

$$\frac{d^2 y_4}{dx^2} = \frac{F_{Ty}(N-x)}{\varepsilon I} \quad (19)$$

同理可得茎秆在 F_{Ty} 作用下任意处垂直挠度为

$$y_4 = \frac{F_{Ty} N x^2}{2 \varepsilon I} - \frac{F_{Ty} x^3}{6 \varepsilon I} \quad (20)$$

茎秆于 B 处在 F_{Ty} 作用下所产生的垂直挠度为

$$y_{my} = \frac{F_{Ty} N(N-b)^2}{2 \varepsilon I} - \frac{F_{Ty}(N-b)^3}{6 \varepsilon I} \quad (21)$$

以图解法求得 F_{Tx} 和 F_T 夹角为 20° ,故可知

$$y_{my} = \frac{F_{Tx} \tan 20^\circ N(N-b)^2}{2 \varepsilon I} - \frac{F_{Tx} \tan 20^\circ (N-b)^3}{6 \varepsilon I} \quad (22)$$

联立式(10)、(22)可知在 F_{Ty} 作用最大垂直挠度 y_{my} 与分禾叶片作用扰动深度 b 之间数学模型为

$$y_{my} = \frac{\tan 20^\circ}{24} (3 \pi^2 N - N + b) \quad (23)$$

由式(18)、(23)易知,茎秆在分禾装置作用下所产生总弯曲挠度受分禾叶片作用扰动深度影响,因此可依据此数学模型进而确定仿生分禾装置相关结构参数。

2.3.3 茎秆回弹建模

由文献[29-30]可知,分禾器脱离所作用的茎秆后,茎秆所做运动遵循欠阻尼振动微分方程

$$m \frac{d^2 y}{dx^2} + c \frac{dy}{dx} + kx = 0 \quad (24)$$

式中 c ——阻尼系数, $N \cdot s/m$

k ——弹性系数, N/m

由积分初始条件可解上述方程为

$$y = y_m e^{-\alpha ft} \left(\frac{\alpha \sin(\sqrt{1-\alpha^2} ft)}{\sqrt{1-\alpha^2}} + \cos(\sqrt{1-\alpha^2} ft) \right) \quad (25)$$

其中 $f = \frac{k}{m} \quad \alpha = \frac{c}{2 \sqrt{km}}$

式中 t ——时间, s

f ——茎秆自然频率, Hz

α ——茎秆临界阻尼系数

联立式(18)、(23)、(25),可得茎秆脱离分禾器后的垂直挠度关于时间的数学模型为

$$y = (y_{mx} + y_{my}) e^{-\alpha ft} \cdot \left(\frac{\alpha \sin(\sqrt{1-\alpha^2} ft)}{\sqrt{1-\alpha^2}} + \cos(\sqrt{1-\alpha^2} ft) \right) \quad (26)$$

2.4 关键参数确定

2.4.1 分禾叶片间宽度

在分禾施药作业过程中,喷头距分禾叶片尾端距离对分禾施药作业效果影响明显,如距离过小,会导致经喷嘴雾化后雾滴撞击分禾叶片内表面,如图8中喷头距分禾叶片尾端 S_{min} 位置处;如距离过大,会造成当茎秆恢复到初始状态时仍未受药,进而影响着药质量,如图8中喷头距分禾叶片尾端 S_{max} 位置处;因此喷头距分禾叶片尾端距离应满足

$$y_m + R \geq S \geq r \quad (27)$$

式中 S ——喷头距分禾叶片尾端距离, m

R ——喷头距分禾叶片尾端 S_{max} 处施药半径, m

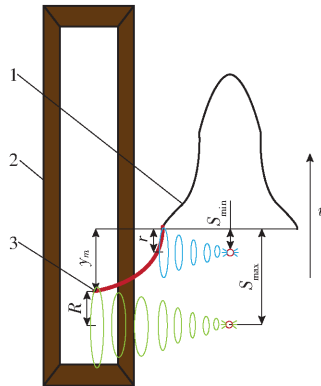


图 8 分禾施药示意图

Fig. 8 Schematic illustration of opener application

1. 仿生分禾叶片 2. 耕作垄台 3. 马铃薯植株茎秆

r ——喷头距分禾叶片尾端 $S_{\min}$ 处施药半径, m

由式(27)及分禾装置作业原理可知,从提高茎秆直接受药效果角度出发,应使 y_m 尽可能大。但由式(18)、(23)可知,为使 y_m 增大,须大幅增加分禾叶片作用扰动深度 b ,因此可能导致茎叶脱落进而影响块茎生长,严重甚至造成茎秆折断。同时当 y_m 过大时,会导致茎秆经分禾叶片作用后振动加剧,进而影响茎秆最终着药量。为探究造成茎叶脱落的关键结构参数,进行了相关前期田间试验。试验在东北农业大学种植基地进行,试验地为东北大垄马铃薯种植地,垄距 800 mm,垄顶宽 400 mm,垄体高 250 mm,品种为克新 13,对 200 株马铃薯茎秆测量得知,马铃薯茎秆平均高度为 820 mm,匍匐茎数平均每株 11 棵,植株平均生长倾斜角约为 37° 。由于试验设备搭载课题组研发的变量施药系统,因此参考国家标准^[31],行进车速为 5.4~9 km/h,为避免速度过大造成茎秆损伤进而影响分禾叶片尾端间距尺寸确定,试验时尽量控制行进车速为 5.4 km/h,为避免多次加工分禾叶片,通过调节快速连接机构实现分禾装置沿喷雾机桁架方向上的平移,以代替不同分禾叶片作用扰动深度对茎秆损伤的影响。参考市面上现有分禾装置结构参数,首先使分禾装置的一侧分禾叶片尾端与作物垄沟中线相距 100 mm,考虑到作物生长性状,机组每行进 10 m 将分禾器沿喷雾机桁架方向移 20 mm,试验重复 3 次,计算平均值并记录,以此探究避免造成茎秆损伤的合理分禾叶片宽度。试验过程如图 9 所示,试验结果如表 1 所示。



图 9 茎秆损伤试验

Fig. 9 Stem damage experiment

1. 下端分禾叶片 2. 上端分禾叶片 3. 快速连接机构 4. 喷雾机桁架

由表 1 可知,随着分禾器对茎秆扰动深度增加,分禾装置对茎秆的损伤机率和程度均会升高,且当扰动深度大于 140 mm 时,茎秆的损伤占比及程度会显著升高。在本试验所进行的地形及作物形态的条件下,为保障植株完整性,最终确定本田间工况下分禾叶片间宽度为 280 mm(即 $b = 140$ mm)。后续实际生产中为满足装置普适性,需将装置改装为分禾叶片宽度可调。

表 1 茎秆损伤试验结果

Tab. 1 Results of stem damage experiment

分禾器对茎秆 扰动深度/mm	茎叶掉落 数目/个	茎秆损伤 占比/%	茎秆未恢复 原状占比/%
100	0	0.0	0
120	0	0.6	0
140	0	1.3	0
160	1	2.9	0.8
180	5	5.6	2.1
200	10	10.2	6.2
220	24	15.2	11.2
100	0	0.0	0
120	0	0.6	0
140	0	1.1	0
160	2	3.2	1.2
180	7	7.2	3.8
200	12	9.8	4.5
220	21	17.4	12.5
100	0	0.0	0
120	0	0.5	0
140	1	1.2	0.5
160	2	4.1	1.0
180	6	7.4	3.5
200	14	9.1	5.1
220	26	14.8	8.6

2.4.2 喷头距分禾叶片尾端距离

经前文分析确定分禾装置对茎秆扰动深度为 140 mm,并且试验地垄距为 800 mm,由此可知喷头在距分禾叶片尾端距离分别为 $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$ 时,喷头距两极限施药平面距离分别为 140、400 mm。参照文献[32-33],同时在课题组前期试验研究的基础上可知,当管路压力为 0.4 MPa,在两施药平面所产生的雾滴施药范围半径分别为 100、150 mm,试验过程如图 10 所示。由式(18)、(23)可知,茎秆在分禾叶片扰动下所产生垂直挠度为 175 mm,由式(27)计算,并综合考虑加工使用等问题,最终确定喷头距分禾叶片尾端距离为 200 mm。



图 10 喷嘴施药半径试验

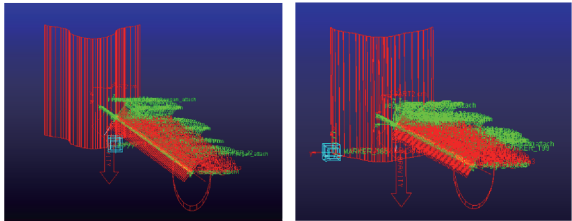
Fig. 10 Nozzle application radius test

3 仿真对比分析

3.1 仿真模型建立与参数设置

利用虚拟样机技术可有效降低产品生产成本,

为验证仿生分禾叶片优越性,使用虚拟仿真软件 ADAMS 来模拟分禾装置与茎秆作用全过程,为节省系统内存以节约时间,将分禾装置做适当简化,仅选取其上仿生分禾叶片作为仿真模型。在建模软件 SolidWorks 中建立仿生分禾装置与原型圆弧分禾装置三维模型,并保存以保真度较高的 *.x_t 文件导入 ADAMS2014 中,定义分禾叶片一个方向移动副,前进速度为 2 m/s,倾斜角为 0°,距地高度为 100 mm,分禾叶片宽度为 280 mm。设置分禾叶片仿真模型材质为钢,由于实际加工分禾叶片材质为 Q235,为保证工况一致性,在 ADAMS 中调用 Material Type 对话框,设置仿真模型材料参数为:密度 7.85 g/cm³,弹性模量 200 GPa,泊松比 0.3。采用离散柔性连接件的方式建立马铃薯植株茎秆,运用 Bushing 连接来模拟植株与大地之间的连接,定义分禾叶片与植株茎秆的接触^[34-36]。分禾叶片与茎秆仿真模型如图 11 所示。



(a) 仿生分禾器与茎秆作用仿真 (b) 原型圆弧分禾器与茎秆作用仿真
图 11 分禾器与茎秆作用仿真

Fig. 11 Simulation of action between opener and stem

3.2 仿真结果分析

分禾叶片与茎秆作用的评价指标主要体现在茎秆受胁迫运动时所受的力及产生速度。运动结束后在 ADAMS 自带后处理软件 ADAMS/Post Processor 中打开数据文件,利用其自带模块可将任意部分受力情况及运动速度在视图区进行可视化显示,由于模拟仿真无法将茎秆数量因素考虑在内,故本文采取单个茎秆的方式来模拟分禾装置与茎秆的接触。分禾装置与茎秆接触点的受力情况如图 12 所示。由图 12 可知,分禾叶片在 0.052 s 时与茎秆发生接触,0.146 s 时分离,总作用时间为 0.094 s。在 0.052 ~ 0.076 s 阶段茎秆与分禾叶片其抛物线首部接触,故两种仿生分禾叶片在此阶段受阻力一致,在

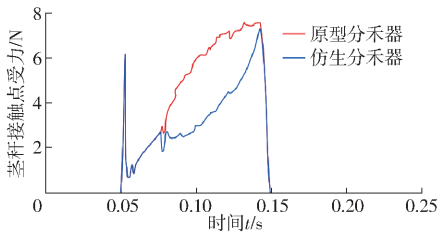


图 12 分禾器与茎秆接触点受力

Fig. 12 Force acting on contact point between opener and stem

0.076 ~ 0.08 s 阶段茎秆与分禾叶片的首部尾部交界处相接触,仿生分禾器切面轮廓曲线导致在 0.077 s 时阻力出现一处骤减,在 0.08 ~ 0.146 s 阶段,两种分禾叶片所受阻力均呈增加趋势,在分离瞬间仿生分禾叶片所受阻力 7.26 N,相比原型圆弧分禾叶片所受阻力 7.54 N 减小 3.7%。由牛顿第三定律可知分禾叶片所受阻力与茎秆接触点受力数值相等,故可知与茎秆作用全过程中,仿生分禾叶片所受阻力小于原型圆弧分禾叶片,通过计算数值均方根得知仿生分禾叶片相对于原型圆弧分禾叶片可减阻 27.7%。

由图 13 可知,在两种分禾叶片对茎秆扰动相同的情况下,茎秆受分禾叶片的胁迫而产生运动,在分禾叶片与茎秆接触全过程中,由于原型圆弧分禾叶片其表面形状使茎秆更容易脱离,因此茎秆在 0.147 s 与分禾叶片分开后致使其回弹速度急剧增加,这不利于药液在茎叶表面沉积。

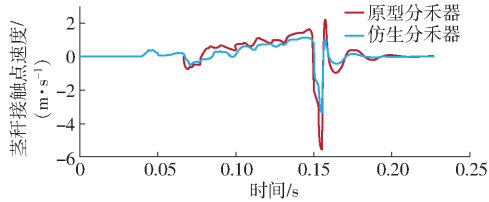


图 13 分禾器与茎秆接触点速度变化曲线

Fig. 13 Velocity of contact point between opener and stem

4 田间试验与结果分析

4.1 试验条件

为验证分禾装置设计的合理性及运动仿真的准确性,并寻找较优的工作参数,于 2020 年 7 月 14—17 日在东北农业大学种植基地进行田间试验,试验地形与试验植株与前文预试验一致。由于本次试验需使用水敏纸(日本 AS ONE)探究雾滴沉积效果,应避免田间相对湿度及叶片呼吸作用对本试验影响,故试验时间选在 14:00—15:00。试验时温度 28℃,空气相对湿度 71%。喷雾装置为 3WF-1000 型悬挂式变量喷雾机,选用 TXA8003VK 型锥形喷嘴,载体农机为约翰迪尔 954 型拖拉机。试验主要仪器有水敏纸(日本 AS ONE)、HTC-2A 型电子温湿度显示计(江苏红旗仪表)、SHHF-50KNS 型数显推拉力计、订书器、卷尺、万能角尺等。

4.2 试验方案

经前文分析及课题组前期试验,并参照文献[10]可知,分禾装置作业效果受行进速度、距地高度、倾斜角三者共同影响,参数示意图如图 14 所示。

试验采用三因素五水平二次回归正交旋转中心

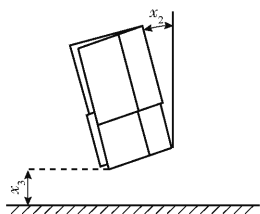


图 14 参数示意图

Fig. 14 Parameter schematic diagram

组合试验方法,选取行进速度 x_1 、倾斜角 x_2 、距地高度 x_3 为试验因素,以行进阻力 y_1 、雾滴沉积度 y_2 为试验评价指标,试验参考 GB/T 20183.3—2006《植保机械 喷雾装置 农业液力喷雾机每公顷施液量调节系统试验方法》及田间植株相关性状,选取行进速度为 5.4 ~ 9.0 km/h、倾斜角为 0° ~ 20°、距地高度为 100 ~ 200 mm。各水平组合下进行 3 组试验,取其平均值作为结果数据,因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码
Tab. 2 Coding of experiment factors

编码	因素		
	行进速度	倾斜角 x_2 /	距地高度
	$x_1 / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	(°)	x_3 / mm
1. 682	9.0	20	200
1	8.3	15.9	179.7
0	7.2	10	150
-1	6.1	4.1	120.3
-1. 682	5.4	0	100

4.3 试验指标及方法

行进阻力使用推拉力计采集数据,推拉力计安装在分禾装置原弹簧的装配位置,为减少试验误差,每次试验取样区域长度为 10 m,区域间隔保持 5 m 以上。试验结果在基于 LabView 所开发的上位机监

测软件实时显示,并保存在 Excel 数据库中,计算均方根作为结果。雾滴沉积度是衡量植保作业效果的重要指标,在每个取样区域内随机选取 5 株植株作为取样点,植株的上、中、下位置的茎叶正反两面各设置 4 个水敏纸采样点,具体布置方式如图 15 所示。

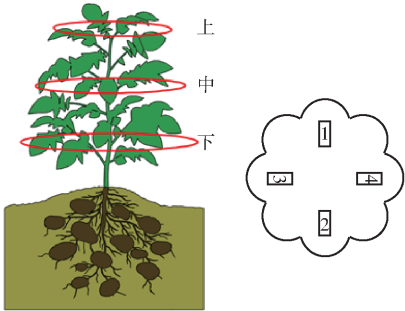


图 15 水敏纸布点示意图

Fig. 15 Water sensitive paper layout diagrams

利用订书器将水敏纸固定在马铃薯叶片的正面及背面。为防止水敏纸局部甚至整张变色,影响试验结果数据,待喷雾机作业后,尽快将水敏纸封装带回实验室进行分析,试验取每平方厘米雾滴沉积数为试验指标,将每个取样区域内 5 个取样点水敏纸雾滴沉积数目统计并取其平均值作为该取样区域数值结果进行分析。试验情况如图 16 所示。

4.4 试验结果与分析

试验结果如表 3 所示(X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值),利用 Design-Expert 对结果进行统计分析,通过显著性分析确定行进阻力 y_1 、雾滴沉积度 y_2 的回归模型,结合响应曲面法分析各因素间的交互作用对试验指标的影响,并根据实际需求对各参数组合进行优化,最终获得较优的各因素组合。

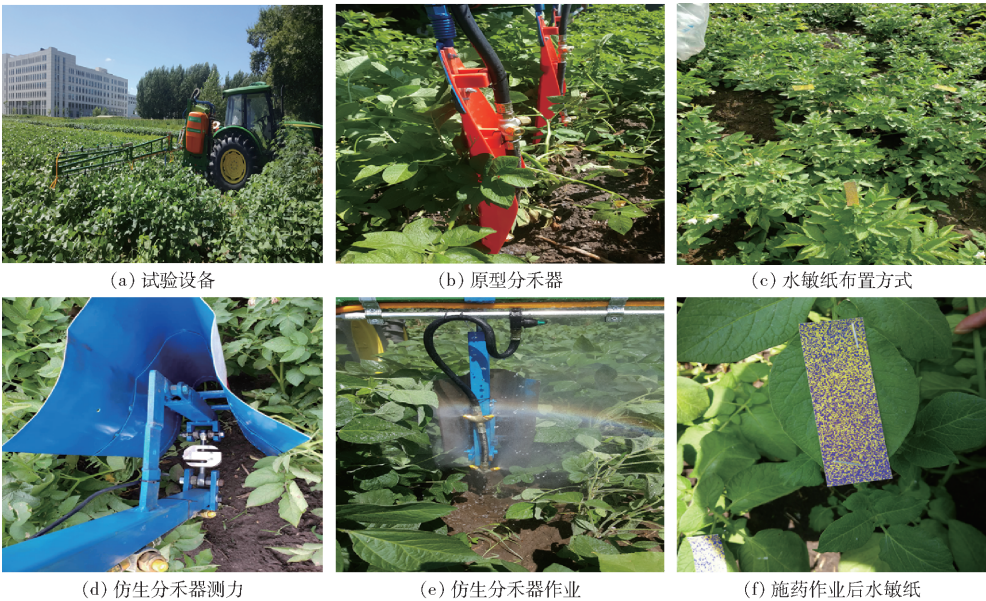


图 16 田间性能试验

Fig. 16 Field performance experiment

表 3 试验方案与结果

Tab.3 Experiment scheme and results

试验 序号	因素			行进阻力 y_1/N	雾滴沉积度 $y_2/(\text{个}\cdot\text{cm}^{-2})$
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	45.5	31.3
2	1	-1	-1	49.5	32.5
3	-1	1	-1	43.6	31.2
4	1	1	-1	46.8	32.1
5	-1	-1	1	37.5	24.3
6	1	-1	1	40.5	24.7
7	-1	1	1	35.5	26.1
8	1	1	1	38.5	28.5
9	-1.682	0	0	38.5	27.5
10	1.682	0	0	48.2	31.2
11	0	-1.682	0	44.3	28.1
12	0	1.682	0	40.5	30.8
13	0	0	-1.682	53.2	35.2
14	0	0	1.682	37.4	26.5
15	0	0	0	44.2	32.5
16	0	0	0	43.6	33.2
17	0	0	0	42.6	30.6
18	0	0	0	42.8	31.2
19	0	0	0	41.5	31.5
20	0	0	0	44.4	32.6
21	0	0	0	42.6	30.8
22	0	0	0	42.7	32.4
23	0	0	0	45.2	32.4

4.4.1 行进阻力回归模型建立与显著性检验

由方差分析可知(表4),在置信度为0.05条件下,因素与行进阻力和雾滴沉积度所建立的模型其 P 值均小于0.01,表明其模型极显著,失拟项 F 显然大于0.05,不存在未加控制因素对试验指标产生影响,模型拟合效果好。通过整个二次回归分析得到对行进阻力的影响由大到小依次为距地高度 X_3 、行进速度 X_1 、倾斜角 X_2 ,其中距地高度 X_3 、行进速度 X_1 对行进阻力 y_1 的影响极显著($P<0.01$),行进速度与倾斜角交互项 X_1X_2 、行进速度与距地高度交互项 X_1X_3 、倾斜角与距地高度交互项 X_2X_3 、行进速度二次项、距地高度二次项对行进阻力的影响不显著。剔除不显著项,得到行进阻力因素编码回归方程为

$$y_1=43.38+2.16X_1-1.1X_2-4.39X_3-0.63X_2^2$$

(28)

4.4.2 雾滴沉积度回归模型建立与显著性检验

通过整个二次回归分析得到对雾滴沉积度的影响由大到小依次为距地高度 X_3 、行进速度 X_1 、倾斜角 X_2 ,其中倾斜角和距地高度的交互项 X_2X_3 对试验指标雾滴沉积度影响显著($P<0.05$)。行进速度与倾斜角交互项 X_1X_2 、行进速度与距地高度交互项

表 4 方差分析

Tab.4 Variance analysis

试验 指标	变异 来源	平方和	自由度	均方	F	P
行进阻力	模型	354.14	9	39.35	21.23	<0.0001
	X_1	63.78	1	63.78	34.42	<0.0001
	X_2	16.46	1	16.46	8.88	0.0106
	X_3	263.36	1	263.36	142.12	<0.0001
	X_1X_2	0.08	1	0.08	0.043	0.8386
	X_1X_3	0.18	1	0.18	0.097	0.7602
	X_2X_3	0.045	1	0.045	0.024	0.8786
	X_1^2	1.39	1	1.39	0.75	0.4016
	X_2^2	6.35	1	6.35	3.42	0.0871
	X_3^2	2.46	1	2.46	1.33	0.2702
	残差	24.09	13	1.85		
	失拟	13.54	5	2.71	2.05	0.1745
	纯误差	10.55	8	1.32		
雾滴沉积 度	总和	378.23	22			
	模型	169.01	9	18.78	21.68	<0.0001
	X_1	9.06	1	9.06	10.46	0.0065
	X_2	6.81	1	6.81	7.86	0.0149
	X_3	106.47	1	106.47	122.94	<0.0001
	X_1X_2	0.36	1	0.36	0.42	0.5296
	X_1X_3	0.061	1	0.061	0.071	0.7945
	X_2X_3	4.65	1	4.65	5.37	0.0374
	X_1^2	19.12	1	19.12	22.07	0.0004
	X_2^2	17.9	1	17.9	20.67	0.0005
	X_3^2	5.1	1	5.1	5.89	0.0305
	残差	11.26	13	0.87		
	失拟	4.67	5	0.93	1.13	0.4154
	纯误差	6.59	8	0.82		
	总和	180.27	22			

X_1X_3 对雾滴沉积度影响不显著($P>0.1$)。剔除不显著项后,得到雾滴沉积度的因素编码回归方程为

$$y_2=31.93+0.81X_1-0.71X_2-2.79X_3+0.76X_2X_3-1.1X_1^2-1.06X_2^2-0.57X_3^2$$

(29)

4.4.3 响应曲面分析

由上文可知,因素间交互作用对行进阻力的影响不显著,则其相互作用响应曲面没有实际意义,因此利用降维法将行进速度调整至零水平,利用Design-Expert绘制响应曲面,考察交互作用对雾滴沉积度的影响。由图17可知,当行进速度为7.2 km/h时,距地高度一定时,雾滴沉积度随着倾斜角增加呈快速增加后缓慢减小趋势,原因是在倾斜角增加初期时,提高了药液在茎秆下端的着药量,但倾斜角持续增加后,影响了茎秆中、上端的药液沉积量。当倾斜角一定时,雾滴沉积度随着距地高度增加而减小,原因是分禾器距地高度增加后,下端茎叶未被分开,无法使茎秆全面受药,导致雾滴沉积度降低,最优的倾斜角在 $7.1^{\circ}\sim12.9^{\circ}$ 之间。

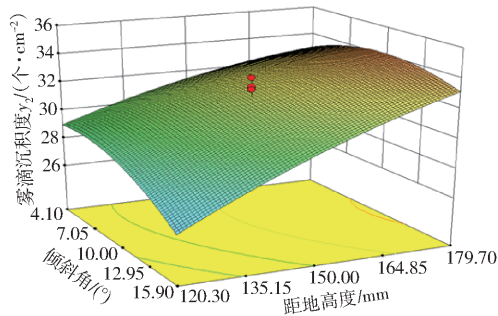


图 17 因素交互作用的响应曲面
Fig. 17 Response surfaces of factor interactions

4.4.4 基于蚁群算法的多目标优化与验证

在进行全局搜索的过程中,蚁群算法能够有效避免陷入局部最优,用 Pareto 解集表示原问题的最优解集,搜索结果都为多目标优化问题的可行解^[37-39]。对于本试验优化而言,为典型的多目标优化问题,为减少搜索时间及迭代次数,采用聚集函数法,通过建立指标综合目标函数手段将原多目标问题转换为单目标问题,能更有利于指导蚁群向高浓度信息素的区域进行搜索,同时为防止函数出现零值或无效值,引入均匀分布在(0,1)的随机数 η ,转换方程为

$$f(x) = w_2 \frac{y_2 - y_{2min} + \eta}{l_{y_2} + \eta} - w_1 \frac{y_1 - y_{1min} + \eta}{l_{y_1} + \eta} \quad (30)$$

式中 $w_1、w_2$ ——1、2 项指标权重
 $l_{y_1}、l_{y_2}$ ——1、2 项指标最大值与最小值的差值

$y_{1min}、y_{2min}$ ——1、2 项指标最小值

行进阻力主要代表机组能耗及茎叶损伤程度;雾滴沉积度主要体现了在植株茎叶表面的附着效果,进而影响整个喷雾作业效果;由此可知,雾滴沉积度是本研究拟提高的主要试验指标,而行进阻力是次要试验指标。最终确定作业阻力、雾滴沉积度的权重 $w_1、w_2$ 分别为 0.3、0.7。通过对图 17 响应曲面的分析,并根据分禾器的实际工作情况最终确定选择优化的数学模型为

$$\begin{cases} \max f(x) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

采用蚁群算法对式(31)数学模型进行多目标优化后,获得数学模型间权衡曲线,其中 Pareto 最优解如图 18 所示。

通过对目标函数求解,得到多组参数优化组合。综合考虑机组工作稳定性、分禾装置作业质量,进而从最优集中筛选得到当行进速度为 7.035 km/h,倾斜角为 15.782°,距地高度为 155.049 mm 时,行进阻力为

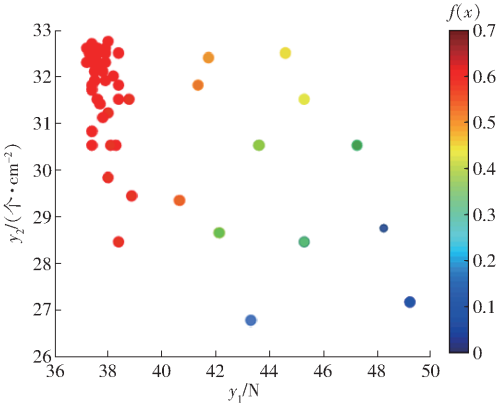


图 18 蚁群算法求解后的前沿分布
Fig. 18 Frontiers distribution of ant colony algorithm

40.6 N,雾滴沉积度为 31.1 个/cm²。考虑试验实际操作可能性和机组实际工作情况,对优化参数进行一定的调整,最终确定行进速度为 7.0 km/h,倾斜角为 16°,距地高度为 155 mm,并在此参数组合下进行试验,采用 5 点取样法在试验地块内选取 5 个试验区域,试验进行 5 次。试验结果如表 5 所示。

表 5 验证试验结果

Tab. 5 Verification test results

项目	行进阻力	雾滴沉积度
	y_1/N	$y_2/(\text{个}\cdot\text{cm}^{-2})$
试验值	38.5	30.5
	39.1	31.8
	39.5	32.8
	38.2	30.8
	38.3	31.4
平均值	38.7	31.5
优化值	40.6	31.1
相对误差/%	-4.6	1.3

由表 5 可知,各试验指标的实测值与优化值较吻合,相对误差均小于 5%,试验参数优化可靠。雾滴沉积度最小值为 30.5 个/cm²,并且本试验数值为茎叶正面及反面计算均值所得,由此可知,作业效果明显高于国家标准^[40]。

4.5 对比试验

4.5.1 安装分禾装置对比试验

为验证所设计仿生植保分禾与吊杆组合施药装置在实际作业中的优越性,在 3WF-1000 型喷雾机两侧桁架上分别安装仿生植保分禾与吊杆组合施药装置与传统茎叶上方施药方式进行对比试验,试验在东北农业大学种植基地进行,试验地为东北大垄马铃薯种植地,垄距 800 mm,垄顶宽 400 mm,垄体高 250 mm,品种为克新 13,马铃薯生长性状与前期试验一致。试验前通过调整分配阀及喷头体旋扭使所有喷头仅有两组进行作业,以屏蔽试验外干扰。采用上文试验方法及试验参数组合,试验进行 5 次,

每次分别取上、中、下 3 处雾滴沉积数目为平均值作为试验数值,试验结果如图 19 所示。

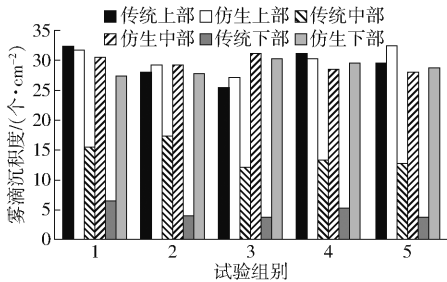


图 19 与传统对比试验结果

Fig. 19 Comparison of test results with traditional application

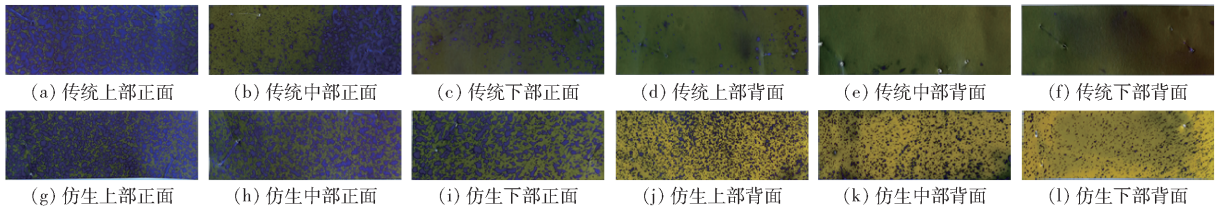


图 20 试验后水敏纸变色

Fig. 20 Water sensitive paper discoloration after test

验证仿真过程准确性,将仿生分禾装置与原型圆弧分禾装置分别安装在喷雾机的左右桁架上,采用优化所得到的最佳参数组合进行试验。试验采用上文方法进行 5 次,试验结果如图 21 所示。

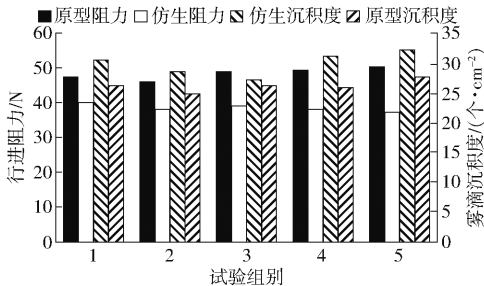


图 21 与原型对比试验结果

Fig. 21 Comparison test results with prototype

由图 21 可知,采用仿生分禾装置,能够有效减小行进阻力。分析 5 组试验结果,传统分禾装置所产生的行进阻力平均值为 48.7 N;仿生分禾装置所产生的行进阻力平均值为 38.6 N,可降低 20.7%。植株经原型圆弧分禾装置作用后,5 组试验所产生雾滴平均沉积度为 26.5 个/cm²;经仿生分禾装置作用后所产生雾滴平均沉积度为 30.1 个/cm²,采用仿生分禾器使雾滴沉积度提高 13.6%,原因为仿生分禾叶片表面特有的轮廓曲线使植株茎秆在分离瞬间沿分禾器行进方向速度降低,增加药液沉积可能性,这与上文仿真结果一致。

由图 19 可知,采用传统施药方式的雾滴沉积度随着采样点位置的降低而明显减小,在上、中、下部的雾滴沉积度变异系数为 64.1%;采用所设计仿生植保分禾与吊杆组合装置,药液在作物的上、中、下部的雾滴沉积度并无明显变化,其变异系数为 5.3%,说明采用所设计仿生植保分禾与吊杆组合装置后,能够显著改善药液在植株中、下层的沉积效果。部分试验后水敏纸变色如图 20 所示。

4.5.2 分禾装置性能对比试验

为验证所设计的仿生植保分禾装置相对于现有原型圆弧分禾装置在作业性能上的优越性,同时为

5 结论

(1) 针对作物生长中后期进行植保作业时茎叶背面及植株中、下部雾滴沉积较差,同时原型圆弧分禾装置对茎叶损伤严重的问题,分析并设计了植保分禾与吊杆组合施药装置,将茎秆视为悬臂梁力学模型,以高沉积、低损伤为目标,建立了茎秆弯曲和回弹过程力学模型,为植保分禾装置设计提供了理论依据。

(2) 采用运动学仿真软件 ADAMS 模拟两种分禾叶片与茎秆产生的碰撞,分析可知,茎秆与仿生分禾叶片的作用阻力比原型圆弧分禾叶片降低 27.7%;由田间试验对比可知,试验作物为马铃薯植株,采用仿生分禾装置作业时,阻力可降低 20.7%。

(3) 进行了二次正交旋转组合试验,选取行进速度、倾斜角、距地高度为试验因素,行进阻力与雾滴沉积度为试验指标,建立了各因素与试验指标间的数学模型,并采用蚁群算法对回归模型进行多目标优化,获得最优参数组合。当行进速度为 7.0 km/h、倾斜角为 16°、距地高度为 155 mm 时,行进阻力均值为 38.7 N,雾滴沉积度均值为 31.5 个/cm²,作业指标高于国家标准。与现有原型圆弧分禾装置相比,仿生分禾装置能够降阻 20.7%、雾滴沉积度提高 13.6%。

参 考 文 献

[1] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议 [J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 133 - 146.
HE Xiongkui. Research progress and developmental recommendations on precision spraying technology and equipment in China [J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 133 - 146. (in Chinese)

- [2] 孙文峰,王立君,陈宝昌,等. 农药喷施技术国内外研究现状及发展[J]. 农机化研究,2009,31(9):225-228.
SUN Wenfeng, WANG Lijun, CHEN Baochang, et al. The present situation and development of study on the pesticide applying technology at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(9): 225-228. (in Chinese)
- [3] 雷晓晖,吕晓兰,李雪,等. 喷杆喷雾机拨禾板固定支架优化设计[J]. 江苏农业科学,2019,47(14):243-247.
- [4] 易哲田,温浩军,潘佛雏. 不同曲面分禾器对分禾的影响及其作业受力分析[J]. 新疆农业科学,2019,56(3):544-550.
YI Zhetian, WEN Haojun, PAN Fochu. Influence of different curved surface graft dividers on graft distribution and analysis of their working force[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(3): 544-550. (in Chinese)
- [5] ZHU R D B H, FOX R D, DERKSEN R C, et al. Development of a canopy opener to improve spray deposition and coverage inside soybean canopies: part 1. mathematical models to assist opener development[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(6): 1905-1912.
- [6] MOURA B, CARDOSO DEUNER C, VISINTIN G L, et al. Use of a canopy opener in fungicide applications to improve Asian soybean rust control[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(6): 1819-1825.
- [7] PRADO E P, POGETTO M H F D A D, CERQUEIRA D T R D, et al. Construction and practical application of a canopy opener device[J]. Engenharia Agrícola, 2016, 36(6): 1126-1135.
- [8] 崔龙飞,薛新宇,秦维祺. 基于EBF神经网络模型的喷雾机吊喷分禾器参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 62-69.
CUI Longfei, XUE Xinyu, QIN Weicai. Parameter optimization on crop divider of cotton defoliation sprayer based on EBFNN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 62-69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160509&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.009. (in Chinese)
- [9] 李瑞敏. 高地隙玉米喷雾机施药装置的设计研究[D]. 石河子:石河子大学,2015.
LI Ruimin. Research of highland gap corn sprayer drug-delivery device[D]. Shihezi: Shihezi University, 2015. (in Chinese)
- [10] 潘佛雏. 密植作物用植保机械分禾装置的研究[D]. 石河子:石河子大学,2018.
PAN Fochu. Study on separate-seedling device of plant protection machinery for dense planting crops[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. (in Chinese)
- [11] 黄春辉,李国祥. 3WP-1350 喷雾机新型分禾器的设计与应用[J]. 新疆农垦科技, 2015, 38(6): 41-42.
- [12] 潘佛雏,温浩军,黄春辉,等. 植保机械分禾装置的设计及试验[J]. 新疆农机化, 2018(5): 13-17.
PAN Fochu, WEN Haojun, HUANG Chunhui, et al. Design and test of plant separation device on plant protection machinery[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2018(5): 13-17. (in Chinese)
- [13] 张金波,佟金,马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 141-145.
ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 141-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?lag=1&file_no=20140422&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022. (in Chinese)
- [14] 贾洪雷,孟凡豪,刘立晶,等. 芯铰式开沟器仿生设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 44-49, 77.
JIA Honglei, MENG Fanhao, LIU Lijing, et al. Biomimetic design and experiment of core-share furrow opener[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 44-49, 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200405&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.005. (in Chinese)
- [15] SULAK K J, BERG J J, RANDALL M. Feeding habitats of the Gulf sturgeon, *Acipenser oxyrinchus desotoi*, in the Suwannee and Yellow rivers, Florida, as identified by multiple stable isotope analyses[J]. Environmental Biology of Fishes, 2012, 95(2): 237-258.
- [16] 余超. 基于鲟鱼的仿生翼型设计及其性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2019.
YU Chao. Bionic hydrofoil design and performance research based on sturgeon[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 高娜娜,张东兴,杨丽,等. 驱动分禾杆与被动分禾栅板组合式防堵机构设计[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 85-91, 52.
GAO Na'na, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design of anti-blocking mechanism combined driven divider with passive residue separating device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 85-91, 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140614&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.014. (in Chinese)
- [18] 高娜娜,张东兴,杨丽,等. 玉米免耕播种机滚筒式防堵机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 31-37.
GAO Na'na, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of drum-type anti-blocking mechanism of no-till planter for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 31-37. (in Chinese)
- [19] 齐文溥. 仿生设计在高速列车头型、车灯设计中的应用[D]. 成都:西南交通大学,2012.
QI Wenpu. Bionic design in the head type and lights of high-speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [20] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 32-39.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 32-39. (in Chinese)
- [21] 赵淑红,谭贺文,张先民,等. 新型锐角开沟器的设计及数值模拟[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 44-48, 58.
ZHAO Shuhong, TAN Hewen, ZHANG Xianmin, et al. Design and numerical simulation of new acute angle opener[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 44-48, 58. (in Chinese)
- [22] 赵淑红,刘宏俊,张先民,等. 滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 26-34.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, ZHANG Xianmin, et al. Design and optimization experiment of working performance of sliding push opener[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 26-34. (in Chinese)
- [23] 单辉组,谢传锋. 工程力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [24] SIVANAGENDRA P, ANANTHASURESH G K. Size optimization of a cantilever beam under deformation-dependent loads with application to wheat stalks[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 39(3): 327-336.
- [25] GMARIN A, SAUER A F. Strength of materials[M]. New York: Macmillan, 1954.
- [26] 赵安庆,袁志华. 玉米茎秆抗倒伏的力学机制研究[J]. 生物数学学报, 2003, 18(3): 311-313.
- [27] 菲赫金哥尔茨. 微积分学教程[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [28] 贺仲雄,赵卫国. 椭圆积分表[M]. 北京:机械工业出版社,1979.
- [29] ZHDANOV O, BLATT M R, CAMMARANO A, et al. A new perspective on mechanical characterisation of Arabidopsis stems through vibration tests[J]. J. Mech. Behav. Biomed. Mater, 2020, 112: 104041.

- [30] THOMSON W T. Mechanical vibrations [M]. New York: Prentice-Hall, 1953.
- [31] GB/T 20183.3—2006 植物保护机械 喷雾设备 第 3 部分: 农业液力喷雾机每公顷施液量调节系统试验方法 [S]. 2006.
- [32] 胡桂琴, 许林云, 周宏平, 等. 影响空心圆锥雾喷头雾滴粒径的多因素分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2014, 38(2): 133—136.
HU Guiqin, XU Linyun, ZHOU Hongping, et al. Analysis of multi-factor influence on droplet size distribution of hollow cone nozzle [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(2): 133—136. (in Chinese)
- [33] 金春玉. 空心圆锥雾化喷嘴喷雾实验与数值研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
JIN Chunyu. Experimental and numerical investigation on sprays of hollow-cone press ure nozzle [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [34] 杜岳峰, 毛恩荣, 宋正河, 等. 基于 ADAMS 的玉米植株收获过程仿真 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 106—111.
DU Yuefeng, MAO Enrong, SONG Zhenghe, et al. Simulation on corn plants in harvesting process based on ADAMS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (Supp.): 106—111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s021&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.021. (in Chinese)
- [35] 杜岳峰, 朱忠祥, 宋正河, 等. 小型玉米收获机分禾与摘穗装置性能仿真 [J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 100—105.
DU Yuefeng, ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, et al. Simulation of divider and snapping roll for small-scale corn harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (Supp.): 100—105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s20&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.020. (in Chinese)
- [36] 郭金伟, 许允斗, 张国兴, 等. 四面体式折展机械臂设计与分析 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 384—389.
GUO Jinwei, XU Yundou, ZHANG Guoxing, et al. Design and analysis of tetrahedral deployable mechanical arm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 384—389. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200944&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.044. (in Chinese)
- [37] 刘可, 李可, 宿磊, 等. 基于蚁群算法与参数迁移的机器人三维路径规划方法 [J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 29—36.
LIU Ke, LI Ke, SU Lei, et al. Robot 3D path planning method based on ant colony algorithm and parameter transfer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 29—36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200103&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.003. (in Chinese)
- [38] 韩兴国, 宋小辉, 殷鸣, 等. 熔融沉积式 3D 打印路径优化算法研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 393—401, 410.
HAN Xingguo, SONG Xiaohui, YIN Ming, et al. Path optimization algorithm of 3D printing based on fused deposition modeling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 393—401, 410. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180350&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.050. (in Chinese)
- [39] 曹如月, 李世超, 季宇寒, 等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 34—39.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (Supp.): 34—39. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s006&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.006. (in Chinese)
- [40] GBT17997—2008 农药喷雾机(器)田间操作规程及喷洒质量评定 [S]. 2008.

(上接第 90 页)

- [15] BENTINI M, CAPRARA C, MARTELLI R. Harvesting damage to potato tubers by analysis of impacts recorded with an instrumented sphere [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(1): 75—85.
- [16] 成大先. 机械设计手册 [M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册 (下册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [18] 孙军, 于文强, 李学强, 等. 马铃薯分选输送线静力学分析与计算方法 [J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 89—92.
- [19] 杨然兵, 杨红光, 尚书旗, 等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 119—126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119—126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160717&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)
- [20] 魏忠彩, 李学强, 孙传祝, 等. 马铃薯收获与清选分级机械化伤薯因素分析 [J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 63—70.
WEI Zhongcai, LI Xueqiang, SUN Chuazhu, et al. Analysis of potato mechanical damage in harvesting and cleaning and sorting storage [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(8): 63—70. (in Chinese)
- [21] 吕金庆, 于佳钰, 冯雪, 等. 辊式马铃薯分级机设计与试验 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 323—332.
LÜ Jinqing, YU Jiayu, FENG Xue, et al. Design and experiment of roller potato grading machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 323—332. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190237&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.037. (in Chinese)
- [22] 田悦, 赵萍, 李永奎, 等. 东北五种早熟马铃薯的物理参数测试与分析 [J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(6): 737—744.
TIAN Yue, ZHAO Ping, LI Yongkui, et al. Measurement and analysis of physical parameters of five early maturing potato varieties in Northeast China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(6): 737—744. (in Chinese)
- [23] 纪晓磊, 于文强, 吴峰倩. 马铃薯清选机关键工作参数的优化分析 [J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 23—27, 32.
JI Xiaolei, YU Wenqiang, WU Fengqian. Optimization analysis of the key working parameters of potato cleaning machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 23—27, 32. (in Chinese)
- [24] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法与数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [25] 葛宜元, 梁秋艳, 王桂莲. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.