

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.019

水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验

刘彩玲 张福印 都鑫 姜萌 袁昊 刘泉

(中国农业大学农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为提高排肥均匀性,以大颗粒尿素为研究对象,设计了一种水平涡轮叶片式精量排肥器,对关键参数进行了设计与机理分析,确定了影响排肥均匀性的影响因素和参数范围,并基于离散元仿真软件确定了对数螺旋线叶片曲面参数。以涡轮叶片数量、涡轮转速和排肥口开度为试验因素,进行了排肥量的单因素试验和排肥均匀性的 Box - Behnken 多因素试验,结果表明,排肥量与转速呈良好的线性关系,决定系数 R^2 不小于 0.96,对于确定叶片数量的排肥涡轮,可匹配不同排肥口开度的涡轮底盘并实时控制排肥涡轮转速来调节排肥量,易于实现变量施肥作业,且排量范围内排肥均匀性较好;涡轮叶片数和排肥口开度的交互作用对排肥均匀性影响高度显著,各因素影响的主次顺序为涡轮叶片数、涡轮转速和排肥口开度;当涡轮叶片数为 8 个、涡轮转速为 98 r/min、排肥口开度为 40° 时,排肥均匀性系数为 97.24%,实际试验验证结果与优化结果相吻合;对磷酸二胺颗粒肥料的适应性验证试验结果表明,两种颗粒肥料排肥器排肥均匀性系数接近 97%,排肥量稳定性变异系数小于 2%,排肥器具有较好的排肥均匀性和排量稳定性;对比分析目前常用外槽轮排肥器,设计的水平涡轮叶片式精量排肥器有效地提高了颗粒肥料的排肥均匀性。

关键词: 精量排肥; 涡轮叶片式排肥器; 排肥均匀性

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0165-10

Design and Experiment of Precision Fertilizer Distribution Mechanism with Horizontal Turbine Blades

LIU Cailing ZHANG Fuyin DU Xin JIANG Meng YUAN Hao LIU Quan

(Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the fertilization uniformity performance, large granule urea was taken as the research object. A horizontal turbine blade type precision fertilizer was designed. The key parameters were designed and analyzed. The influencing factors and parameter range were determined. And based on the discrete element simulation software, the surface parameters of logarithmic spiral blade were determined. Single-factor test of fertilizer amount and Box - Behnken test of uniformity of fertilization were carried out with number of turbine blades, turbine rotation speed and angle of fertilizer hole as the main factors. The test verified that the precision fertilizer distribution mechanism with one turbine had a better row fertilizer performance which was complied with the technical specifications of fertilization machinery quality evaluation. Also, the test result showed that the fertilizer amount per second of the fertilizer distribution mechanism with one turbine was decreased with the increase of rotation speed of turbine, showing a linear relationship with a correlation coefficient larger than 0.96. Therefore, the fertilizer distribution mechanism with one turbine can adjust the fertilizer amounts by varying the rotation speeding of turbine to meet the requirements of different fertilization. Therefore, the mechanism was easy to be used on the variable-rate fertilization technology. Using Design-Expert 8.0.6 data analysis software, multiple regression analysis and response surface analysis of experimental data were carried out. The regression model between the factors and qualified rate was established and influence of factors on indexes were analyzed. The influence relation of factors on the qualified rate was determined and the order of importance was number of turbine blades, turbine rotation speed and angle of fertilizer hole in turn.

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD020060704)

作者简介: 刘彩玲(1972—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业机械与农业装备研究, E-mail: cailingliu@cau.edu.cn

Based on the regression model, the parameters were optimized and the experimental verification was worked out. Results showed that the optimal parameter combination of angle of fertilizer hole, turbine rotation speed and number of turbine blades was 40° , 98 r/min and 8, respectively. The test results were consistent with the theoretical analysis results. The results of adaptability verification test for diamine phosphate granular fertilizer showed that the uniformity coefficient was close to 97%, and the variation coefficient of fertilizer output stability was less than 2%, the fertilizer had good fertilization uniformity and stability performance. The horizontal turbine blade type precision fertilizer can effectively improve the fertilization uniformity of granular fertilizer by comparative analysis with common fertilizer with external groove wheel.

Key words: precision fertilization; horizontal turbine blade type precision fertilizer; fertilization uniformity

0 引言

施肥是农作物种植中的重要环节,是实现农业高产、高效与粮食安全的重要保证^[1]。但我国化肥施用过程中普遍存在施用量大,投放利用率低等问题,不仅增加了生产成本,而且造成了土壤面源污染,制约了农业的可持续发展^[2]。为提高肥料精准施用效果,国外较早提出了变量施肥技术,技术较为成熟^[3-7]。近年来,我国对变量施肥技术研究也取得较大进展,但研究主要集中在施肥处方图生成技术和控制系统,大多基于传统机型上的改造,排肥机构多采用外槽轮形式^[8-11]。外槽轮排肥器虽结构简单、成本低,但排肥脉动导致排肥均匀性差,直接影响精准变量施肥的精度和稳定性^[12-15]。研究精量排肥机构,提高排肥均匀性,不仅可节约肥料,提高产量,减小污染,对有效实施变量施肥作业也具有重要意义。

目前,国内外设计和研究的排肥器形式主要有外槽轮式、转盘式、离心式、螺旋式、星轮式和振动式等,其中外槽轮式排肥器应用最广^[16-19]。为提高外槽轮排肥均匀性,文献[20-21]利用离散元仿真技术对外槽轮有效工作长度、槽轮结构参数、排种舌开度等影响工作性能的参数进行了研究;祝清震等^[22]对不同结构参数下的直槽轮排肥器进行了参数优化;施印炎等^[23]将排肥舌替代原有的塑料毛刷,提高了排肥性能;孙伟等^[24]设计了螺旋齿槽轮排种器,提高了排种均匀性。这些研究成果为施肥装置的进一步优化提供了参考,但无论轮槽交错排列还是螺旋斜槽的结构,都不能从根本上消除结构本身带来的脉动影响^[25]。

为提高排肥均匀性,本文提出一种水平涡轮叶片式精量排肥器,以颗粒化肥为研究对象,理论分析排肥器排肥原理,对关键结构进行设计和分析,搭建排肥器性能试验平台,并对关键参数进行优化,以期整机设计提供参考。

1 排肥器结构与工作原理

水平涡轮叶片式精量排肥器已授权国家发明专利(专利号:2014106911751),其结构主要包括肥箱、破拱刀轴、破拱刀、联轴器、排肥涡轮、排肥涡轮底座及传动轴等,如图1所示。其工作原理为传动轴带动破拱刀顺时针转动,肥料顺利填充至肥箱,同时排肥涡轮底座内的水平排肥涡轮在螺旋渐变梳刷叶片作用下将肥料梳刷均匀,并经过排肥涡轮底座上的底座排肥口进入出肥口,精确、定量、均匀稳定排出流动性好的颗粒肥料,适应精量排肥的要求。该排肥机构结构简单,适于排施流动性好的颗粒和晶状肥料。

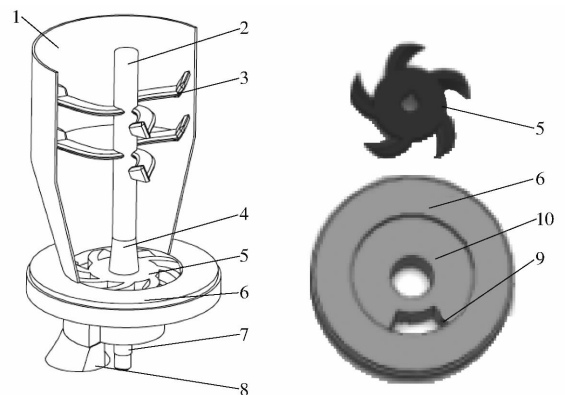


图1 水平涡轮叶片式排肥器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of horizontal turbine blade fertilizer mechanism

1. 肥箱 2. 破拱刀轴 3. 破拱刀 4. 联轴器 5. 排肥涡轮 6. 排肥涡轮底座 7. 传动轴 8. 出肥口 9. 底座排肥口 10. 底座凹槽

2 排肥器关键结构设计及参数优化分析

2.1 破拱刀结构设计

为防止颗粒肥料结拱影响其流动性,合理设计破拱刀至关重要。设计的破拱刀如图2所示,搅拌刀具为L形,未开刃口,刀具宽度为20 mm,厚度10 mm,焊接于直径为30 mm的传动轴上,两层布置,上层刀具与下层刀具相距120 mm;同一圆周布

置 3 把刀具, 刀具之间相位角为 120°。破拱刀轴通过联轴器与传动轴相连, 工作过程中, 传动轴带动破拱刀反复击打结块肥料, 确保肥料松散。

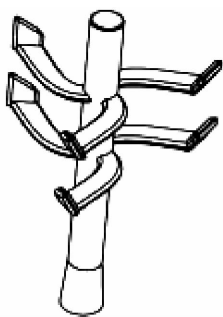


图 2 破拱刀结构示意图

Fig. 2 Diagram of arch-breaking equipment

2.2 排肥涡轮设计

排肥涡轮是排肥器的关键部件, 工作时依靠涡轮叶片的转动对肥料颗粒施加推力使其运动, 为避免肥料颗粒受较大离心力而飞溅, 或转速过低致使肥料颗粒难以排出造成残留, 排肥涡轮叶片曲面曲线参数至关重要, 直接影响肥料颗粒的受力和运动, 是保证排肥均匀性、稳定性的关键因素之一。叶片曲面曲线设计应使肥料颗粒受力和运动方向一致, 保证肥料颗粒适宜的合作用力且指向该接触点曲面法线方向, 参考《农业机械设计手册》中型体曲面的设计, 物体在螺旋线型曲面上受力具有良好的的一致性和连续性^[26-27], 因此选取对数螺旋线型设计排肥涡轮叶片曲面。对数螺旋线型曲面曲线极坐标模型为

$$\rho = ke^{r\theta} \quad (1)$$

式中 k ——常数 r ——指数系数
 θ ——极角 ρ ——极径

其中 k 和 r 是影响曲线的主要参数, k 确定曲线开端位置, 影响曲率, r 影响极径, 极径越小, 曲线越偏移排肥口方向, 因此在确定 k 和 r 时尽量使极径方向指向排肥口, 使肥料颗粒向出肥口有效流动, 在三维模型中调整参数并利用仿真和 3D 打印技术进行了预试验, 确定叶片曲面曲线的数学模型为

$$\rho = 1.8e^{0.08\theta} \quad (2)$$

设计的排肥涡轮结构如图 3 所示。参考已有研究, 设计叶片半径为 30 mm, 圆心到叶片根部距离为 21 mm, 排肥轮厚度为 10 mm。

为保证排肥涡轮工作时颗粒肥料良好的流动



图 3 排肥涡轮三维结构示意图

Fig. 3 Diagram of three dimensional structure of fertilizer exhaust turbine

性, 涡轮叶片上端内侧设计大于肥料颗粒与 ABS 间静摩擦角的 55° 倾斜面, 便于肥料充入涡轮叶片间隙内, 同时降低肥料对排肥轮接触部分压力保证良好的流动性, 其缓冲作用也可减少化肥颗粒受相互挤压而造成的破碎。

涡轮叶片数量与排肥口开度的配合对排肥均匀性有很大影响: 叶片数量过少增加排肥脉动性, 均匀性差, 排量大; 过多使肥料颗粒不易进入叶片凹槽, 则排量小, 本文初步设计叶片数量为 4、6、8。

2.3 涡轮底座排肥口设计与分析

排肥涡轮与涡轮底座排肥口开度的合理配合影响排肥性能。排肥口可采用逆螺旋等异形结构, 为便于加工, 本设计采用扇环形排肥口的设计, 其内圆直径 42 mm, 外圆直径 60 mm (图 1)。排肥涡轮转动时, 排肥口未被叶片遮盖部分面积为肥料流经的区域, 称为排肥口有效面积, 排肥口开度用排肥口扇环角 (扇环形排肥口对应圆心角) 表示。图 4 为 6 叶片涡轮排肥口开度 60° 时, 涡轮叶片从接触排肥口 (0°) 开始转动 15°、30°、45°、60° 时排肥口面积动态变化模型图。

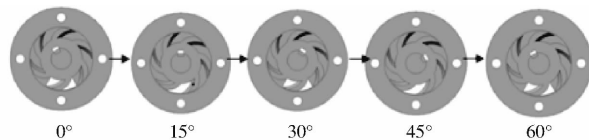


图 4 排肥口开度 60° 时扇环排肥口面积变化模型图

Fig. 4 Fan annular outlet area variation model of 60°

为研究排肥口开度对排肥均匀性的影响, 分别建立了 $\rho = 1.8e^{0.08\theta}$ 型 6 叶片涡轮在 30°、45° 和 60° 排肥口开度时排肥口面积动态变化过程模型, 并以排肥口面积变化系数 (排肥口有效面积与排肥口总面积比值) 为指标计算了涡轮转动过程中排肥口有效面积的变化情况, 计算结果见表 1。其计算方法为: 基于 Creo 软件建立三维模型, 借助 Photoshop 软件, 将叶片旋转 0°、15°、30°、45°、60° 时涡轮底座排肥口图像截取并进行二值化处理, 利用 Matlab 软件生成排肥口处被涡轮叶片遮盖部分与未遮盖出肥口有效部分的灰度直方图。图 5a 为某一时刻扇环排肥口处理后的灰度图, 图 5b 为其对应的灰度直方图, 其中阈值 60~80 之间部分为图 5a 中白色部分低灰度, 表示排肥口未被遮挡部分; 阈值在 240~260 之间为图 5a 中深黑色部分高灰度, 表示排肥口被遮挡部分; 阈值 220~230 之间为背景无关部分。

表 1 中面积变化系数为低灰度与排肥口处总像素点数比值, 其含义为排肥口有效面积和排肥口总面积之比, 在工作过程中其比值变化趋于平缓, 则排肥均匀性和稳定性越好。排肥涡轮叶片扫过排肥口

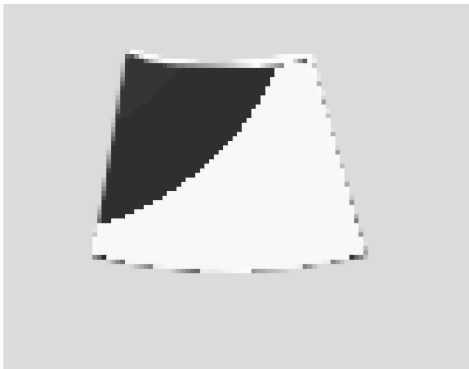
时该比值变化曲线见图6。经方差分析得排肥口开度 30° 、 45° 和 60° 时排肥口面积变化系数偏差平方和分别为0.136、0.011和0.092,数值较小,表明设

计的曲线型叶片具有较好的排肥均匀性。排肥口开度 45° 具有较好的排肥均匀性,作为后期试验因素的零水平。

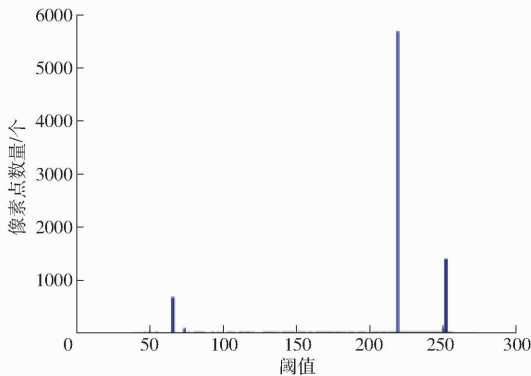
表1 6叶片涡轮与不同角度出肥口配合动态排肥分析

Tab.1 Analysis of dynamic fertilizer discharging at different angles

排肥口开度/ $^\circ$	0°		15°		30°		45°		60°	
	灰度(低/高)	面积变化系数	灰度(低/高)	面积变化系数	灰度(低/高)	面积变化系数	灰度(低/高)	面积变化系数	灰度(低/高)	面积变化系数
30	416/916	0.312 3	231/923	0.200 1	384/615	0.384 3	333/533	0.615 4	334/651	0.660 9
45	1 228/1 314	0.483 0	713/857	0.465 6	857/990	0.530 0	1 120/1 498	0.572 1	1 171/1 490	0.440 0
60	1 110/1 515	0.422 8	760/2 120	0.263 8	714/1 930	0.270 0	1 071/1 214	0.468 7	1 142/1 520	0.429 0



(a) 灰度



(b) 灰度直方图

图5 排肥口排肥过程灰度图与灰度直方图

Fig.5 Gray image and histogram of fertilizing process

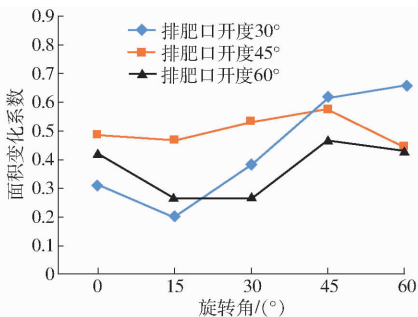


图6 涡轮叶片不同旋转角时排肥口面积变化系数曲线

Fig.6 Coefficient of variation area at different rotation angles of turbine blade

排肥涡轮作匀速转动,忽略肥料颗粒之间的相互作用和空气阻力影响,肥料颗粒在排肥涡轮叶片凹槽内侧面的受力分析如图7所示。图中肥料颗粒为A,质量 m ,以肥料A的中心点为坐标原点,涡轮叶片内表面的法线方向为 X 轴,涡轮叶片内表面的切线方向为 Y 轴,涡轮底面法线方向为 Z 轴建立坐标系。 G 为所受的重力; N_1 为涡轮底座对肥料颗粒的法向作用力; N_2 为叶片凹槽对肥料颗粒的法向作用力; F_1 为涡轮底座对肥料颗粒的切向摩擦力; F_2 为叶片凹槽对肥料颗粒的切向摩擦力; F_3 为肥料颗粒所受的离心力。 η 为 F_3 与 Y 轴的夹角。

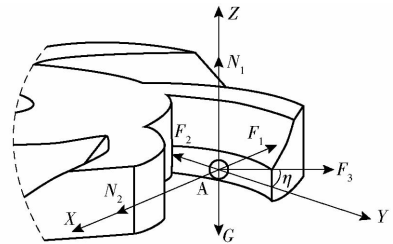


图7 肥料颗粒在叶片凹槽内侧面受力分析

Fig.7 Analysis of force on inner side of groove of fertilizer granules

设肥料颗粒A的绝对加速度为 a ; a_1 为 Y 轴方向加速度; a_2 为 X 轴方向加速度; r_1 为回转半径; μ 为肥料颗粒与涡轮表面摩擦因数; ω 为涡轮回转角速度。由牛顿第二定律可知,肥料颗粒在空间坐标系 X 、 Y 、 Z 轴受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_2 - F_3 \cos \eta = ma_1 \\ N_2 - F_1 - F_3 \sin \eta = ma_2 \\ F_1 = \mu N_1 \\ F_2 = \mu N_2 \\ F_3 = m\omega^2 r_1 \\ a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \end{cases} \quad (3)$$

整理式(3),可得

$$a = \sqrt{\omega^4 r^2 - 2g\omega^2 r \sin \eta + 2\mu g \omega^2 r (\sin \eta - \cos \eta)} \quad (4)$$

3 肥料颗粒运动分析

3.1 肥料颗粒在排肥涡轮叶片凹槽内侧的运动分析

为便于理论分析,假定肥料颗粒为一刚性质点,

通过受力分析可知,涡轮转速、涡轮叶片形状、接触面材料影响肥料颗粒的受力,特别是涡轮转速对肥料颗粒的运动规律影响较大,转速过大造成肥料颗粒飞溅,转速过低造成堵塞滞留,涡轮转速的设计应保证肥料颗粒适宜的合作用力且指向肥料颗粒该接触点的曲面法线方向为宜。

3.2 肥料颗粒在排肥涡轮叶片斜面上的受力分析

排肥涡轮转速对排肥涡轮叶片斜面上肥料颗粒的运动特性影响较为敏感,为确定排肥涡轮的最高转速,分析肥料颗粒在排肥涡轮叶片斜面上的受力,受力模型如图 8 所示。

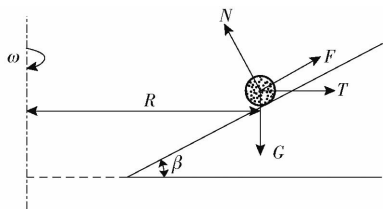


图 8 肥料颗粒在涡轮叶片斜面上的受力分析

Fig. 8 Stress analysis of fertilizer particles on surface of turbine blade

图 8 中 N 为叶片斜面对肥料颗粒法向作用力; F 为叶片斜面对肥料颗粒切向摩擦力; T 为离心力; β 为斜面倾角(叶片斜面与底座平面夹角)。为保证肥料颗粒不因排肥涡轮转速过大导致其不能进入凹槽,应使肥料颗粒能沿斜面向下运动,满足以下条件

$$\begin{cases} G\sin\beta - T\cos\beta > f(T\sin\beta + G\cos\beta) \\ G = mg \\ T = m\omega^2 R \\ \omega = \frac{\pi n}{30} \end{cases} \quad (5)$$

式中 n ——排肥涡轮转速, r/min

R ——肥料颗粒所在叶片斜面位置处回转半径, mm

f ——颗粒肥料与排肥涡轮叶片斜面的摩擦因数

简化式(5)得

$$n < 30 \sqrt{\frac{\tan(\beta - \arctan f)}{R}} \quad (6)$$

涡轮叶片斜面倾角 55° , 采用自制斜面仪测定大颗粒尿素与 ABS 静摩擦因数 f 为 0.3, 为确保肥料颗粒能全部进入排肥轮凹槽内, R 应为排肥涡轮叶片半径(30 mm), 代入式(6)计算可得

$$n < 160 \text{ r/min} \quad (7)$$

排肥涡轮允许最高转速与摩擦因数、涡轮叶片斜面倾角、肥料颗粒所在叶片斜面位置处回转半径 R 有关, 越靠近回转中心, 肥料颗粒越容易滑落凹槽内, 涡轮叶片半径越大, 肥料颗粒越容易飞离叶片斜

面, 因此设计排肥涡轮叶片半径为 30 mm, 此时排肥涡轮所允许的最高转速为 160 r/min。

4 叶片曲面曲线方程仿真设计与分析

为探讨涡轮叶片曲面曲线方程对排肥性能的影响, 进行了不同曲面参数下排肥性能仿真分析。

4.1 仿真模型与仿真参数

为减少仿真计算量去掉模型中与运动无关部件, 仿真模型如图 9 所示。选用大颗粒尿素为研究对象, 颗粒表面没有黏附力, 选择 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型, 涡轮采用 ABS 工程材料注模加工。以 3.35 mm 为颗粒模型直径平均值, 颗粒按正态分布方式生成, 确定仿真参数为^[12]: 泊松比 0.4, 弹性模量 28 MPa, 密度 1 337 kg/m³; 颗粒与颗粒间恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.35、0.3、0.26, 颗粒与工程材料间恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别为 0.6、0.17、0.01。依据瑞利波法确定时间步长为 2.95×10^{-5} s, 考虑颗粒运动达到稳定状态设定仿真时间为 8 s。应用 EDEM 后处理 Selection 模块在纵向距排肥口下方 5 cm 处设置 Grid Bin Group, 虚拟接肥容器为直径 140 cm、高 200 cm 的圆柱体, 记录不同时刻流经该虚拟体的肥料总数量。

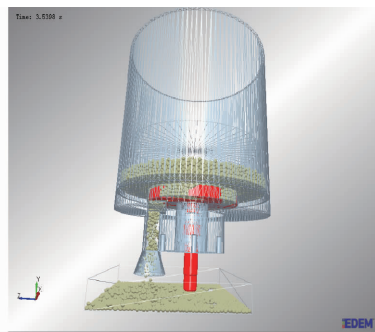


图 9 EDEM 仿真试验模型

Fig. 9 Model of EDEM simulation test

4.2 试验指标

为探讨排肥均匀性, 测量 0.02 s 输出质量流率, 以质量流率变异系数 V 作为评价指标, 计算公式为

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%$$

其中

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^i x_k}{i} \\ S = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^i (x_k - \bar{x})^2}{i - 1}} \end{cases} \quad (8)$$

式中 x_k ——第 k 时刻排肥轮质量流率, g/s

\bar{x} —— i 个质量流率平均值, g/s

S —— i 个质量流率标准差

4.3 试验设计与结果分析

基于 2.3 节分析,设计了图 10 所示 3 种不同曲面参数的涡轮: $k_1 = 0.6, r_2 = 0.08$; $k_1 = 1.2, r_2 = 0.08$; $k_1 = 1.8, r_2 = 0.08$ 。试验分析转速为 80 r/min、30°排肥口涡轮底座时肥料颗粒运动情况,每次试验重复 3 次求平均值。

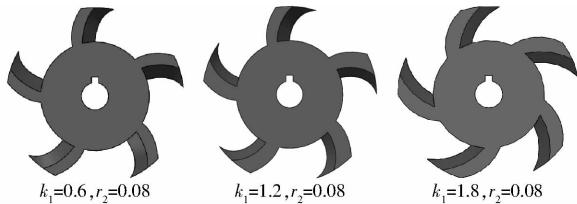


图 10 3 种不同叶片曲面参数排肥涡轮

Fig. 10 Three different fertilizer turbines in blade parameter

由表 2 可知,3 种不同曲面参数质量流率变异系数不大于 10.02%,表明对数螺旋线型曲面曲线具有较好的排肥均匀性,本文选用了变异系数较低的 $k_1 = 1.8, r_2 = 0.08$ 的曲面参数设计,提高排肥均匀性。

表 2 不同曲线参数质量流率变异系数

Tab.2 Variation coefficient of mass flow rate with different curve parameters %

试验序号	k_1		
	0.6	1.2	1.8
1	9.26	9.87	7.68
2	9.37	9.96	7.84
3	9.42	10.23	7.64
均值	9.35	10.02	7.72

5 排肥器工作性能试验

在确定的排肥涡轮叶片曲面曲线下,涡轮转速、涡轮叶片数量和排肥口开度不仅影响排肥均匀性,也是影响排肥量的重要因素,因此,为探讨排肥器工作性能,优化其设计参数,搭建试验台并进行排肥量和排肥均匀性试验。

5.1 试验条件

试验选用大颗粒尿素作为研究对象,采用精度为 0.01 mm 的千分尺测得其算术平均直径为 3.35 mm,堆积密度 1.30 g/cm³,利用 DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱采用干燥法测得含水率为 0.10%。试验地点为中国农业大学工学院。试验装置如图 11 所示,直流步进电机为深圳亿星科技有限公司生产的 MA860H 型步进电机;基于单片机控制步进电机驱动器控制电机转速;采用高精度电子秤(顺展电子计数秤 ACS 系列,精度 0.01 g)称量排出肥料的总质量;采用 Phantom V9.1 型高速摄影机实

时记录电子秤的刻度变化,通过计算机处理得到试验数据。

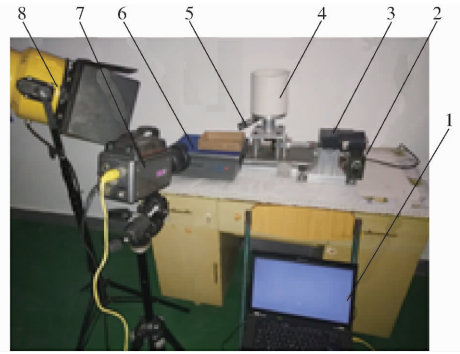


图 11 涡轮排肥机构试验台

Fig. 11 Test bench of turbine type fertilizer mechanism

1. 计算机 2. 步进电机驱动器 3. 步进电机 4. 肥箱 5. 排肥漏斗 6. 精密电子秤 7. 高速摄影机 8. 补光灯

5.2 试验方法与评价指标

排肥涡轮传动轴在步进电机驱动下转动,肥料从排肥口排出落入电子秤上方的接肥容器中,通过高速摄像记录电子秤显示屏数字变化,每 1 s 计数一次,排肥器稳定工作后选取 5~15 s 共 10 个数据为一次试验样本。为分析涡轮精量排肥机构排肥均匀性,选取排肥均匀性系数 U 作为评价指标,计算公式为

$$U = 1 - C_v \quad (9)$$

式中 U ——排肥均匀性系数,%

C_v ——排肥均匀性变异系数,%

5.3 转速与排肥量相关性试验

涡轮转速、叶片数量和排肥口开度影响排肥量,为考察各因素对排肥量的影响,基于前述分析在涡轮转速 40~160 r/min,涡轮叶片数目 4、6、8,排肥口开度 30°~60°范围内进行单因素试验,试验结果见图 12。

由图 12 可得,排肥量与涡轮叶片数、排肥口开度及涡轮转速密切相关。排肥量随涡轮叶片数增大而减小;不同排肥口开度时排肥量均随转速增大而减小,且转速与排肥量呈良好线性相关(决定系数 R^2 不小于 0.96)。排肥量最小为 13.62 g/s,最大为 97.8 g/s,不同排肥口开度时匹配不同涡轮转速,可实现不同排肥量的需求。因此,可通过实时控制涡轮转速或同时控制排肥口开度实现变量施肥对不同排肥量适应性的需求。

5.4 排肥均匀性的多因素试验与结果分析

为研究各因素对排肥均匀性的影响,根据前述参数分析结果,设计 Box- Behnken 试验,各因素及水平见表 3,试验方案及试验结果见表 4。

5.4.1 回归模型检验

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行

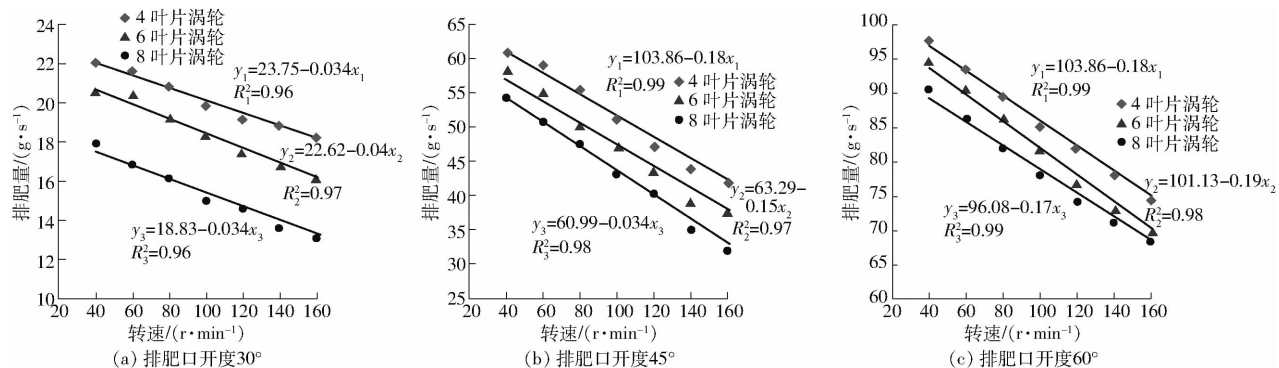


图 12 各因素水平时转速与排肥量关系

Fig. 12 Relationship between rotational speed and fertilizer amount

表 3 试验因素及编码

Tab.3 Factors and levels

编码	因素		
	叶片数 α /个	转速 β /($r \cdot \min^{-1}$)	排肥口开度 φ /(°)
1	8	120	60
0	6	100	45
-1	4	80	30

表 4 试验方案与试验结果

Tab.4 Design scheme and test results

试验序号	涡轮叶片数	涡轮转速 β /	排肥口开度	均匀性系数
	α /个	($r \cdot \min^{-1}$)	φ /(°)	U/%
1	6	100	45	96.24
2	8	100	30	97.02
3	4	120	45	92.01
4	6	100	45	95.98
5	6	80	60	92.68
6	6	120	60	91.12
7	8	80	45	95.86
8	6	80	30	94.56
9	4	80	45	93.02
10	6	100	45	95.78
11	4	100	60	94.89
12	6	100	45	96.52
13	8	120	45	96.98
14	8	100	60	94.85
15	6	120	30	91.05
16	6	100	45	96.02
17	4	100	30	90.08

二次回归方差分析,结果见表 5。二次回归模型极显著 ($P < 0.01$),回归模型有实际意义,模型修正决定系数为 0.93,回归决定系数为 0.97,表明模型与试验数据拟合度较高,所得因素与均匀性系数回归方程为

$$U = 96.11 + 1.84\alpha - 0.62\beta + 0.10\varphi + 0.45\alpha\beta - 1.75\alpha\varphi + 0.49\beta\varphi + 0.11\alpha^2 - 1.75\beta^2 - 2.01\varphi^2 \quad (10)$$

由表 5 可得,在选取因素范围内,涡轮叶片数对

排肥均匀性系数影响极显著,涡轮转速影响显著,排肥口开度对排肥均匀性系数存在一定的影响,其影响显著性由大到小为 α 、 β 、 φ ,涡轮叶片数和排肥口开度存在着交互作用。

表 5 二次回归方差分析

Tab.5 Quadratic regression analysis of variance

来源	自由度	平方和	F	P
α	1	27.08	30.38	0.0009**
β	1	1.14	1.28	0.0150*
φ	1	0.95	1.07	0.0765
$\alpha\beta$	1	0.25	0.32	0.2945
$\alpha\varphi$	1	12.18	13.66	0.0077**
$\beta\varphi$	1	0.08	0.09	0.3362
α^2	1	0.048	0.054	0.8224
β^2	1	12.90	14.47	0.0067**
φ^2	1	16.93	18.99	0.0033**
模型	9	76.05	9.48	0.0036**
误差	7	0.32		
总数	16			

注: ** 表示极显著 ($P \leq 0.01$); * 表示显著 ($0.01 < P \leq 0.05$)。

5.4.2 因素对排肥均匀性影响的响应曲面分析

为分析涡轮叶片数、转速、排肥口开度对排肥均匀性影响及各因素间相互关系,利用 Design-Expert 8.0.6 软件绘制响应曲面,见图 13。

图 13a 表明,涡轮转速为零水平,固定排肥口开度,排肥均匀性系数随涡轮叶片数增加而增加,在 8 叶片涡轮处取得最大值;固定涡轮叶片数,随着排肥口开度的增大排肥均匀性系数呈先增加后减小的趋势,从变化趋势图可以看出,涡轮叶片数和排肥口开度的交互作用影响更显著;图 13b 表明,排肥口开度为零水平时,固定涡轮叶片数,涡轮转速在 80 ~ 120 r/min 的变化过程中,排肥均匀性系数先增大后减小,在此转速范围内存在最大值;固定涡轮转速,排肥均匀性系数随涡轮叶片数的增大而增大;图 13c 表明,排肥叶片数为零水平时,固定排肥口开度,排肥均匀性系数随转速的增加先增加后减小,原

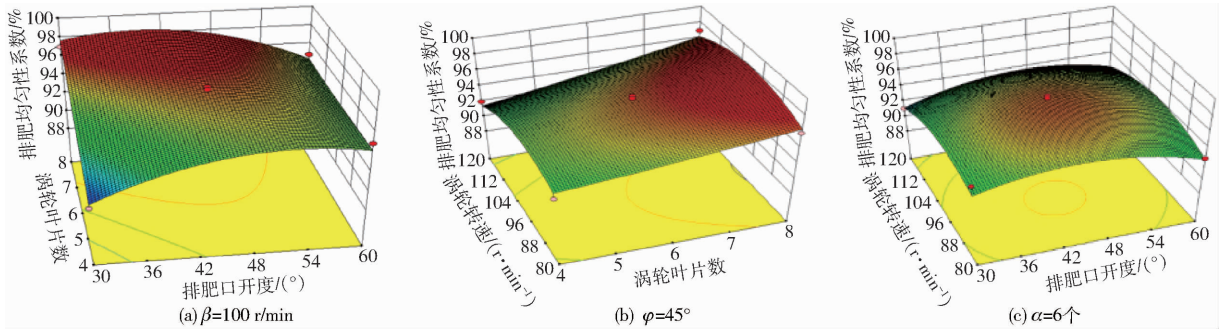


图13 响应曲面

Fig. 13 Responsesurface analysis diagram

因为过大的涡轮转速导致肥料颗粒飞溅影响排肥均匀性系数；固定涡轮转速，排肥均匀性系数随排肥口开度变化呈先增加后减小的趋势。涡轮叶片数和排肥口开度间的交互作用更显著，试验结果与理论分析结论一致。

5.4.3 试验结果目标优化与试验验证

为寻求各因素最优组合，以表3各因素范围为约束条件，以排肥均匀性系数回归模型为目标函数，应用 Design-Expert 8.0.6 对排肥均匀性系数优化求解，得涡轮叶片数8，涡轮转速98 r/min，排肥口开度40°时预测排肥均匀性系数最优值为97.24%。在自制试验台上对优化结果进行排肥均匀性系数和排肥量试验，选用前述大颗粒尿素，重复试验5次，试验结果见表6，大颗粒尿素均匀性系数均值为97.32%，与最优值相差0.1个百分点，验证优化结果正确性。

表6 最优条件下两种颗粒肥料验证试验结果

Tab.6 Results of two kinds of granular fertilizers under optimal conditions

试验号	大颗粒尿素		磷酸二铵	
	排肥量/ (g·s ⁻¹)	均匀性系 数/%	排肥量/ (g·s ⁻¹)	均匀性系 数/%
1	39.1	96.85	34.1	97.06
2	39.8	97.62	34.3	96.56
3	39.4	97.98	35.4	97.28
4	40.1	96.78	34.1	97.31
5	39.7	97.36	35.1	96.57
均值	39.6	97.32	34.6	96.96
变异系数/%	0.97	0.52	1.80	0.38

为验证该排肥器对不同肥料的适用性，表6选用磷酸二铵颗粒肥料(平均直径为2.97 mm、堆积密度0.96 g/cm³、含水率1.04%)作为试验材料，在最优参数下重复试验5次，排肥均匀性系数均值为96.96%，排肥均匀性较好，表明对不同颗粒肥料具有较好的适应性。两种颗粒肥料的排肥量变异系数较小，表明设计的排肥器排肥量稳定性较好。

5.4.4 排肥均匀性对比验证分析

为验证排肥器排肥均匀性，与目前应用最多的外槽轮排肥器进行对比分析。文献[28]对槽轮式排肥器进行了不同转速的试验研究，施肥均匀性变异系数最优为45.7%；文献[12]基于离散元法优化了外槽轮排肥器，其均匀性变异系数平均为23.32%，最优为10.89%；文献[22]对凹槽数目、槽轮半径、槽轮有效工作长度和凹槽截面形状进行了优化，其排肥均匀度变异系数最优为5.48%；文献[24]对直齿和螺旋齿进行了对比试验研究，均匀性变异系数最优为35.4%；文献[17]对双排肥轮进行了优化，排肥均匀度变异系数最优为15.42%。从目前研究结果看，外槽轮排种器可满足NY/T 1003—2006规定的施肥均匀性变异系数小于40%的要求，均匀性得到了提高，但外槽轮由于结构限制不能从根本上消除排种脉动现象，这是外槽轮的基本缺陷^[25]。本文研究的水平涡轮对数螺旋线叶片曲面曲线结构利于保证排肥的连续性，在研究参数范围内排肥均匀性系数不小于90.08% (表4)，最优可达97.02%，有效提高了颗粒肥料的排肥均匀性。

6 结论

(1)为提高排肥均匀性设计了水平涡轮叶片式排肥器，完成关键结构参数设计与分析，确定了涡轮转速、涡轮叶片数以及涡轮底盘排肥口开度为主要影响因素，并确定了参数范围。

(2)仿真试验分析了3种不同对数螺旋线型曲面参数，表明曲面曲线具有较好的排肥均匀性，并确定了参数方程。

(3)排肥量台架试验表明，可通过改变涡轮转速实现排肥量的线性调节，可通过实时控制涡轮转速或同时控制排肥口开度实现变量施肥对不同排肥量适应性的要求。

(4)排肥均匀性的 Box - Behnken 试验二次回归分析和响应曲面分析表明，涡轮叶片数和排肥口

开度存在着交互作用,各因素影响重要性次序依次为涡轮叶片数、涡轮转速、排肥口开度;在涡轮叶片数为 8 个、涡轮转速为 98 r/min、排肥口开度为 40° 时,排肥均匀性系数最优,为 97.24%,验证试验与优化结果基本吻合。该参数下磷酸二胺也具有较好

的适应性;两种颗粒肥料排肥量稳定性研究结果表明,排肥量变异系数较小,表明设计的排肥器排肥量稳定性较好;对比分析目前常用外槽轮排肥器,设计的涡轮叶片式精量排肥器有效地提高了颗粒肥料的排肥均匀性。

参 考 文 献

- [1] 付宇超,袁文胜,张文毅,等.我国施肥机械化技术现状及问题分析[J].农机化研究,2017,39(1):251-255,263.
FU Yuchao, YUAN Wensheng, ZHANG Wenyi, et al. The research and development of the falling tree fruits and nuts collect and pick-up technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 251-255, 263. (in Chinese)
- [2] SU Ning, XU Taosheng, SONG Liangtu, et al. Variable rate fertilization system with adjustable active feed-roll length[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(4): 19-26.
- [3] TOLA E, KATAOKA T, BURCE M, et al. Granular fertiliser application rate control system with integrated output volume measurement[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 411-416.
- [4] FULTONJ P, SHEARER S A, STOMBAUGH T S. Pattern assessment of a spinner disc variable-rate fertilizer applicator[J]. Sacramento Convention Center, Sacramento, California, 2001.
- [5] FULTONJ P, SHEARER S A, CHABRA G, et al. Performance assessment and model development of a variable-rate, spinner-disc fertilizer applicator[J]. Trans. of ASAE, 2001, 44(5): 1071-1081.
- [6] HAYDEN G L, IAN J Y. Accessing spreader performance for variable rate fertilizer application [C] // ASAE Annual International Meeting. Tampa, Florida, 2005: 17-20.
- [7] TONY E, GIYOUNG K W. Development of a uniformity controlled granular fertilizer spreader [C] // ASABE Annual International Meeting. Portland, Oregon, 2006: 9-12.
- [8] 汪小岳,陈满,孙国祥,等.冬小麦变量施肥机控制系统的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(增刊2):88-92.
WANG Xiaochan, CHEN Man, SUN Guoxiang, et al. Design and test of control system on variable fertilizer applicator for winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 88-92. (in Chinese)
- [9] 孟志军,赵春江,付卫强,等.变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法[J].农业机械学报,2011,42(7):204-209.
MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, FU Weiqiang, et al. Prescription map identification and position lag calibration method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 204-209. (in Chinese)
- [10] 耿向宇.基于GPS\GPRS的变量施肥机控制系统研究[D].上海:上海交通大学,2007.
GENG Xiangyu. Study on control system of variable rate fertilizer applicator based on GPS\GPRS[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [11] 古玉雪,苑进,刘成良.基于模糊系统的开度转速双变量施肥控制序列生成方法[J].农业工程学报,2011,27(11):134-139.
GU Yuxue, YUAN Jin, LIU Chengliang. FIS-based method to generate bivariate control parameters regulation sequence for fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 134-139. (in Chinese)
- [12] 汪博涛.基于离散元法的外槽轮排肥器工作过程仿真参数优化[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
WANG Botao. Simulation and parameter optimization of the working process of the outer grooved wheel fertilizer distributor based on discrete element method[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [13] 潘世强,赵亚祥,金亮,等.2BFJ-6型变量施肥机外槽轮式排肥器的设计与试验研究[J].中国农机化学报,2016,37(1):40-42.
PAN Shiqiang, ZHAO Yaxiang, JIN Liang, et al. Design and experimental research of external grooved wheel fertilizer apparatus of 2BFJ-6 type variable rate fertilizer applicator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 40-42. (in Chinese)
- [14] 李树伟.水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥装置设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
LI Shuwei. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization drive for precision rice hill-direct-seeding machine[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [15] 王金武,李树伟,张墨,等.水稻精量穴直播机电驱式侧深穴施肥系统设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(8):43-54.
WANG Jinwu, LI Shuwei, ZHANG Zhao, et al. Design and experiment of electrical drive side deep hill-drop fertilization system for precision rice hill-direct-seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 43-54. (in Chinese)
- [16] 梁方,杨淦光,许丰,等.外槽轮式播种机播量控制系统设计与试验[J].农机化研究,2019,41(10):153-157.
LIANG Fang, YANG Ganguang, XU Feng, et al. The seeding rate control system design and experiment of the external groove wheel seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(10): 153-157. (in Chinese)
- [17] 顿国强,于春玲,郭艳玲,等.双齿轮式排肥器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(3):87-96.

- DUN Guoqiang, YU Chunling, GUO Yanling, et al. Design and experiment of double-gear type fertilizer apparatus[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 87-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200310&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.010. (in Chinese)
- [18] 付丽娟. 基于步进电机的变量施肥装置的设计[J]. 科技创新导报, 2015, 12(3): 109.
FU Lijuan. Design of variable rate fertilization device based on stepping motor[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(3): 109. (in Chinese)
- [19] 孙雪松. 马铃薯播种机螺旋推进式排肥器的研究与试验[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
SUN Xuesong. Research and experiment of screw fertilizer device for potato planter[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [20] 张涛, 刘飞, 刘月琴, 等. 离散元模拟外槽轮排肥器排量分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(9): 198-201.
ZHANG Tao, LIU Fei, LIU Yueqin, et al. Discrete element simulation of outer groove wheel type fertilizer discharging device capacity analysis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9): 198-201. (in Chinese)
- [21] 杨洲, 朱卿创, 孙健峰, 等. 基于 EDEM 和 3D 打印成型的外槽轮排肥器排肥性能研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 175-180.
YANG Zhou, ZHU Qingchuang, SUN Jianfeng, et al. Study on the performance of fluted roller fertilizer distributor based on EDEM and 3D printing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 175-180. (in Chinese)
- [22] 祝清震, 武广伟, 罗长海, 等. 基于姿态实时监测的多路精准排肥播种控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 155-163.
ZHU Qingzhen, WU Guangwei, LUO Changhai, et al. Design of multipath precision fertilizer and sowing control system based on attitude real time monitoring[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 155-163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s021&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.021. (in Chinese)
- [23] 施印炎, 陈满, 汪小昆, 等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 97-103.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 97-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170712&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012. (in Chinese)
- [24] 孙伟, 吴建民, 黄晓, 等. 2BFM-5 型山地免耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 26-31.
SUN Wei, WU Jianmin, HUANG Xiao, et al. Design and field experiments of 2BFM-5 hilly no-tillage seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 26-31. (in Chinese)
- [25] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [26] 陈志. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2007: 194-195.
- [27] 蒲平. 图像中对数螺旋线的拟合[J]. 微型机与应用, 2011(12): 44-46.
PU Ping. Fitting logarithmic spiral in image[J]. Microcomputer and Application, 2011(12): 44-46. (in Chinese)
- [28] 王金峰, 高观保, 王金武, 等. 叶片调节式水田侧深施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 68-76.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WANG Jinwu, et al. Design and test of adjustable blades side deep fertilizing device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 68-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180308&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.008. (in Chinese)