

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.022

大白菜种子收获分离清选装置设计与试验

王升升^{1,2} 陈盼¹ 卢梦晴¹ 耿令新¹ 姬江涛^{1,2} 杨芳¹

(1. 河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003; 2. 机械装备先进制造河南省协同创新中心, 洛阳 471003)

摘要: 针对大白菜种子机械化收获时滚筒脱出物各组分农艺形态差异大、物理特性复杂等问题,设计了一种由内流式圆筒筛(内置螺旋输送机)、横流吸杂风机等组成的分离清选装置。阐述了该装置的结构组成和工作原理,通过理论分析确定了其关键部件的结构与工作参数。选取圆筒筛转速、内螺旋输送机转速和横流风机转速为试验因素,以含杂率和损失率为性能指标,结合单因素试验结果,开展正交试验,采用综合评分法优化得到了装置最佳工作参数组合并进行了试验验证。结果表明:影响装置清选性能指标的试验因素由大到小为:横流风机转速、圆筒筛转速、内螺旋输送机转速,装置的最优参数组合为:圆筒筛转速 70 r/min、内螺旋输送机转速 200 r/min、横流风机转速 700 r/min。在该参数组合下进行了性能验证试验,试验结果为含杂率 2.75%,损失率 0.62%,满足行业相关标准要求。

关键词: 大白菜; 种子收获; 分离清选; 试验

中图分类号: S225.99; S226.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0181-10

Design and Experiment of Separation and Cleaning Device for Chinese Cabbage Seeds Harvester

WANG Shengsheng^{1,2} CHEN Pan¹ LU Mengqing¹ GENG Lingxin¹ JI Jiangtao^{1,2} YANG Fang¹(1. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. Collaborative Innovation Centre of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province, Luoyang 471003, China)

Abstract: In view of the difficulty in separation and cleaning caused by the great difference of agronomic morphology and complex physical characteristics of the components of the exfoliates during the mechanized harvesting of Chinese cabbage seeds, a separation and cleaning device composed of an internal flow cylindrical sieve (with a inner spiral auger) and a cross-flow suction fan was designed. The structure and working principle of the device were described, and the structure and working parameters of its key components were determined by theoretical analysis. The rotational speed of the cylinder sieve, the inner spiral auger and the cross-flow fan were selected as the test factors, the hybrid rate and the loss rate were taken as the performance indexes, the orthogonal test was carried out, and the optimum working parameter combination of the device was obtained by using the comprehensive scoring method and the test was verified. The results showed that the main and second order of the test factors that affected the cleaning performance of the device were speed of the cross-flow fan, speed of the cylindrical screen and speed of the auger, and the optimal parameter combination of the separation and cleaning device was speed of the cross-flow fan of 70 r/min, speed of the auger of 200 r/min and speed of the cross-flow fan of 700 r/min. The performance verification test was carried out under the parameter combination, and the results showed that the impurity content and loss rate of Chinese cabbage seeds were 2.75% and 0.62% respectively, which met the requirements of relevant industry standards.

Key words: Chinese cabbage; seeds harvested; separation and cleaning; experiment

收稿日期: 2020-08-12 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701200)

作者简介: 王升升(1986—),男,讲师,博士生,主要从事农作物收获装备研究,E-mail: wangsheng5288@126.com

通信作者: 姬江涛(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备设计与理论研究,E-mail: jjt0907@163.com

0 引言

大白菜是我国栽培面积最大的蔬菜作物,每年播种面积近 267 万 hm^2 , 占全国蔬菜总播种面积的 15% 左右。作为我国蔬菜种子产业的重要组成部分,大白菜种子机械化收获水平落后,收割、脱粒、清选等环节依赖人工,严重制约了大白菜种子产业的良性发展^[1-2]。随着种植的规模化和集约化,传统的人工收获方式已无法满足大白菜规模化制种的需求^[3-4]。因此,研制适于大白菜种子机械化收获的技术装备迫在眉睫。

分离清选作为大白菜种子机械化收获的关键环节,其性能直接影响整机作业质量和效率。大白菜与油菜同属十字花科,种子籽粒小,单粒质量轻,种子收获时植株分枝密布交叉,相互牵连,滚筒脱出物组分特性复杂。国内外相关学者针对油菜机械化收获分离清选装置已开展了较为系统的研究^[5-15],包括脱出物物理机械及空气动力学特性分析、脱出物与筛面的摩擦特性、脱出物在筛面上的运动特性以及脱出物在气流场中的受力分析等,这些研究为油菜机械化收获清选机构参数优化提供了重要的理论依据。

上述研究主要是基于传统的风筛式清选装置进行分析,通过离心风机与不同类型振动清选筛配合完成分离清选作业,筛面结构庞大,清选风道复杂,不宜作为小型大白菜种子机械化收获分离清选装置的关键部件。大白菜种子收获时,脱出物各组分物理特性复杂、形态差异大,且轻杂物中存在的大量白色隔膜和碎果荚在气流作用下易携裹籽粒造成夹带损失。为此,基于大白菜种子机械化收获滚筒脱出物物理几何特性,在轴向输送分离和气流高效风选相结合的基础上,设计大白菜种子收获分离清选装置,以期为大白菜种子收获高效低损清选提供理论依据和技术参考。

1 基本结构及工作原理

大白菜种子分离清选试验台主要由输送带、分离圆筒筛、内螺旋输送机、横流风机、接料箱、电机及机架等组成,如图 1 所示。滚筒脱出物(籽粒、果荚壳、短茎秆和轻杂物)经输送带与喂料口进入分离圆筒筛,内螺旋输送机贯穿于圆筒筛内部,起到对混合物的助流、扰动及输送作用^[16-17]。横流风机为吸杂风机,设置于圆筒筛落料口斜下方。圆筒筛转向与内螺旋输送机相反,且外表面焊接有螺旋叶片,可使得透过圆筒筛的籽粒与轻杂物向横流风机吸风口处汇集。

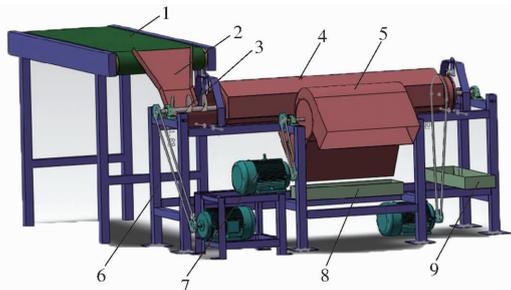


图 1 分离清选装置试验台三维图

Fig. 1 Three-dimensional diagram of separation and cleaning device test bed

1. 输送带 2. 喂料口 3. 内螺旋输送机 4. 圆筒筛 5. 横流风机 6. 机架 7. 电机 8. 接料箱 9. 接草箱

该装置工作原理如图 2 所示。工作时,待清选物料由输送带运送至喂料口,物料在内螺旋输送器的推送和搅动作用下进入圆筒筛。籽粒和轻杂物在轴向运动过程中透过筛孔落入清选室,尺寸较大的短茎秆和果荚壳由于无法透筛,在内螺旋输送机推送下从圆筒筛后端排杂口排出,完成分离过程。

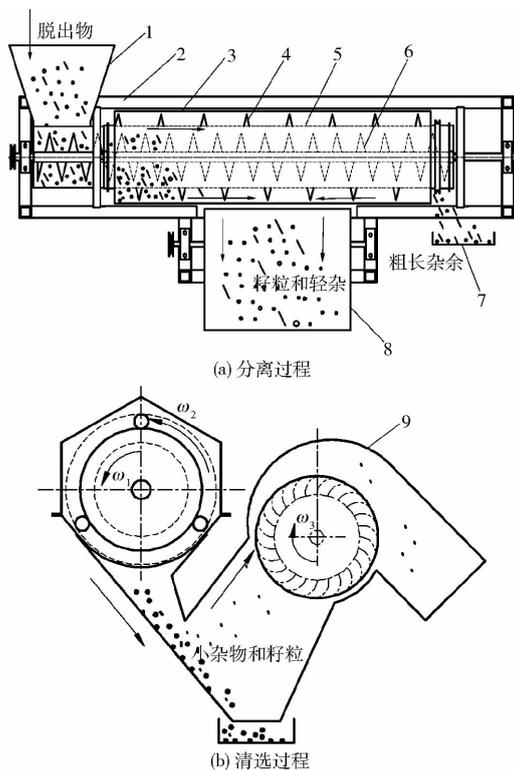


图 2 分离清选装置工作原理图

Fig. 2 Principle and structure diagram of separation and cleaning device

1. 喂入口 2. 机架 3. 上壳体 4. 外螺旋叶片 5. 圆筒筛 6. 内螺旋输送机 7. 物料收集装置 8. 滑板 9. 横流风机

圆筒筛外表面焊接的螺旋叶片沿圆筒筛主体呈对称分布,将完成透筛的籽粒及轻杂及时向中间落料口集中,提高筛分效率。圆筒筛与内螺旋输送机均由电机提供动力,实现二者同轴转动、转向相反的差速运动,有利于物料流动及分离过程。位于圆筒

筛落料口斜下方的横流风机吸走轻杂物,干净的籽粒经清选室滑落至接料箱内,完成清选过程。该装置的分离清选效果与圆筒筛有效筛分面积、圆筒筛转速、内螺旋输送机转速、横流风机转速等因素密切相关。

2 关键零部件设计

2.1 内螺旋输送机结构参数设计

内螺旋输送机由焊在轴上的螺旋叶片和外壳构成,螺旋叶片表面由垂直于轴的元线绕轴做等速回转并沿轴向等速移动而形成,具有输送、助流、分散待清选物料的作用。螺旋角大,推运速度快,效率高但损失率大,螺旋角过小影响推运而发生堵塞现象。为使物料顺利输送,内螺旋输送机内径处螺旋角应满足 $\alpha, \leq 90^\circ - \varphi$, φ 为物料摩擦角,取 16° 。本研究选取内螺旋输送机螺旋角为 45° 。

综合考虑筛分效率及整机尺寸,参考农业机械设计手册^[18],按照推荐采用的 R20 优先系数,选取内螺旋输送机轴径 $d = 40 \text{ mm}$,外径 $D = 384 \text{ mm}$,螺距 $t = 200 \text{ mm}$ 。一般螺旋输送机与侧壁间隙为 $5 \sim 8 \text{ mm}$,因大白菜种子受输送机挤压易破碎,为减少挤压所用带来的籽粒破碎,内螺旋输送机与外壳间隙取较大值 $a = 8 \text{ mm}$ 。故圆筒筛内径尺寸 $D_1 = 384 + 2 \times 8 = 400 \text{ mm}$,圆筒筛主要参数如图 3 所示。

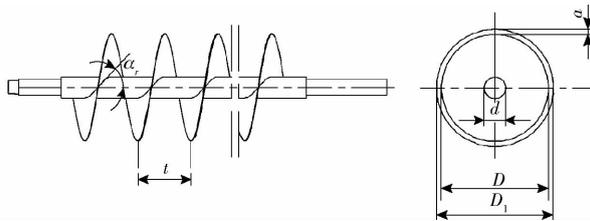


图 3 内螺旋输送机主要结构参数

Fig. 3 Main structural parameters of inner spiral auger

内螺旋输送机转速对整机的筛分工作效率影响显著。本研究以内螺旋输送机推运量为边界条件确定其合理转速范围。为确保圆筒筛中物料分离清选过程的顺利进行,避免发生堵塞,内螺旋输送器的推运量需大于喂入量。实际测得大白菜种子联合收获机脱出物喂入量较大值 $Q_s = 0.8 \text{ kg/s}$,因此,根据螺旋输送机推运量计算式为

$$Q_1 = \frac{\pi}{24} [(D - 2\lambda)^2 - d^2] \psi t n a C \times 10^{-10} > Q_s = 0.8 \text{ kg/s} \quad (1)$$

式中 n ——内螺旋输送机转速, r/min
 ψ ——充满系数,一般取 $0.3 \sim 0.4$
 γ ——种子或杂余单位容积质量, kg/m^3
 C ——倾斜输送系数

取充满系数 $\psi = 0.4$,倾斜输送系数 $C = 1$,将相

关参数代入式(1)可计算得: $n_{\min} = 71.4 \text{ r/min}$ 。

为保证筛分效率,降低分离损失,内螺旋输送机线速度不宜过大,参考相关资料,内螺旋输送机最大线速度不超过 6 m/s ,即最大转速 $n_{\max} = 300 \text{ r/min}$ 。因此,选取内螺旋输送机转速范围为 $71.4 \sim 300 \text{ r/min}$ 。

2.2 分离圆筒筛结构参数设计

圆筒筛转速是影响圆筒筛分离作业性能的主要参数之一。圆筒筛工作转速应介于最大和最小转速之间。最大转速是籽粒随圆筒筛旋转到最高位置时,离心力等于其重力时所对应的转速,而最小转速是籽粒随圆筒筛旋转到水平位置时,离心力等于其重力在筛孔处产生的摩擦力所对应的转速,但这种确定转速的方法仅考虑了特殊位置,因此所确定的转速范围相对粗略。

大白菜种子在分离装置作用下,在圆筒筛中存在沿筛面运动、下滑、透筛 3 个状态,且透筛过程主要是在籽粒下滑过程中完成的。因此,需根据滑动条件和甩出条件来确定合理转速。假设运动过程中某时刻,籽粒之间、籽粒与杂质之间相互作用力忽略不计,且忽略内螺旋输送机对籽粒受力的影响。大白菜种子受离心力方向与圆筒筛竖直中心线夹角为 α 。

根据达朗伯原理,由图 4、5 可知,在滑动平衡点处有

$$f - mgsin\alpha \geq 0 \quad (2)$$

$$N - mgcos\alpha - m\omega^2 D_1/2 = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} f = \mu N \\ \mu = \tan\varphi \end{cases} \quad (4)$$

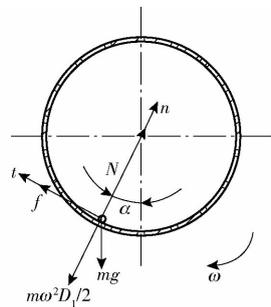


图 4 滑动平衡受力分析

Fig. 4 Force analysis of sliding balance

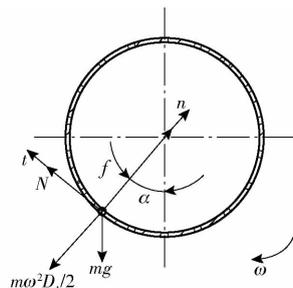


图 5 甩出平衡受力分析

Fig. 5 Force analysis of throwing

联立(2)~(4)可得

$$\omega^2 = \frac{2g \sin(\alpha - \varphi)}{D_1 \sin \varphi} \quad (5)$$

$$n' = \frac{30\omega}{\pi} \approx 30 \sqrt{\frac{2 \sin(\alpha - \varphi)}{D_1 \sin \varphi}} \quad (6)$$

式中 m ——大白菜种子质量, kg

D_1 ——圆筒筛内径, m

g ——重力加速度, m/s^2

ω ——圆筒筛角速度, rad/s

μ ——摩擦因数

n' ——滚筒转速, r/min

f ——摩擦力

同理,根据达朗伯原理,对甩出点处进行受力分析可得

$$\omega^2 = -\frac{2g \cos(\alpha + \varphi)}{D_1 \cos \varphi} \quad (7)$$

$$n' = \frac{30\omega}{\pi} \approx 30 \sqrt{\frac{2 \cos(\alpha + \varphi)}{D_1 \cos \varphi}} \quad (8)$$

分别绘制两种条件下角速度与平衡角的关系曲线,如图6所示。由图可知,在同种工况下,滑动曲线对应的平衡角小于甩出曲线对应的平衡角,即当圆筒筛以某一角速度转动时,大白菜种子先转过相应的滑动平衡角,然后开始下滑,由于甩出平衡角大于滑动平衡角,在下滑过程中,一旦遇到筛孔,就一定能从筛孔中分离出。因此通过大白菜种子的滑动条件来确定圆筒筛转速的方法可行。

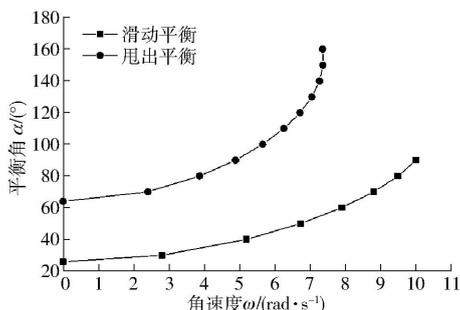


图6 角速度与平衡角关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of angular velocity and equilibrium angle

试验测得大白菜种子与钢板摩擦角 φ 为 16° 。为保证圆筒筛中籽粒的透筛效果,滑动平衡角 α 应比物料摩擦角 φ 大 $5^\circ \sim 10^\circ$,本研究取 $\alpha_1 = 23^\circ$,可得

$$n'_{\min} = \frac{13.37}{\sqrt{D_1/2}} = 29.9 \text{ r/min}$$

增加 α 可以加大滑动区域,但 α 大于 90° 后,大白菜种子将穿过筛孔向上抛出,下落到圆筒筛外表面后可能会沿表面下滑,一定程度上会阻碍筛筒内的籽粒向外甩出,从而降低筛分效率,因此 α 以不

大于 90° 为宜,本研究取 $\alpha_2 = 90^\circ$ 可得出

$$n'_{\max} = \frac{42.96}{\sqrt{D_1/2}} = 96.1 \text{ r/min}$$

因此,通过计算可确定圆筒筛转速范围为 $29.9 \text{ r/min} < n' < 96.1 \text{ r/min}$ 。

分离圆筒筛有效筛分面积为物料在运动过程中接触筛网部分的面积,其参数决定了该装置可负担的喂入量。有效筛分面积与圆筒筛直径、长度及转速有关,筛分有效面积 S 为

$$S = lL \quad (9)$$

$$\text{其中 } l = \frac{D_1}{2}(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (10)$$

为确保筛分工作的顺利进行,圆筒筛筛网需满足在单位面积下筛网所承担的筛分量 q_s 大于分离清选装置的喂入量 Q_s ,即

$$q_s S \geq Q_s = 0.8 \text{ kg/s} \quad (11)$$

式中 l ——有效筛分弧长, rad

L ——筛网长度, m

本研究取 $q_s = 2.5 \text{ kg/s}$,代入式(9)~(11)计算可得有效筛分面积 $S = 0.32 \text{ m}^2$,圆筒筛长度 $L \geq 1.37 \text{ m}$,取 $L = 1.4 \text{ m}$ 。

筛孔尺寸直接影响装置的分离效果和工作负荷。尺寸过大,不利于物料的输送和清选,且不易将短茎秆和果荚壳从物料中分离出来,使含杂率增加;尺寸过小,则增加了圆筒筛长度和清选装置体积,且不利于籽粒的透筛,使清选损失率增加。

试验测得大白菜种子粒径分布在 $1.2 \sim 3.2 \text{ mm}$ 之间。为保证正常分离,减少损失且不造成堵塞,本文选取圆筒筛筛孔形状为圆孔,筛孔孔径 $d_0 = 6 \text{ mm}$,筛孔按照等边三角形排列,为保证圆筒筛筛面整体刚度,取孔距为 $d_1 = 9 \text{ mm}$,如图7所示。

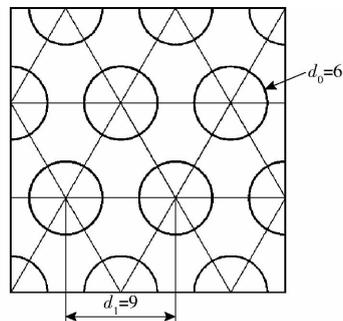


图7 筛孔排布方式

Fig. 7 Arrangement of sieve holes

筛面有效面积系数即开孔率为筛孔总面积与筛面面积的比值。开孔率越大,籽粒在每次与筛面接触时,透过筛孔的机会就越多,从而可以提高单位面积的清选能力和筛分效率。按照上述筛孔尺寸及排布方式,开孔率计算式为

$$K = \frac{\pi d_0^2}{2\sqrt{3}d_1} \quad (12)$$

计算得筛面开孔率 K 约为 0.4。此外,为实现将透过筛孔部分的籽粒及轻杂物及时推送至气流清选室进行清选作用,在圆筒筛外部焊接对称分布、旋向相反的螺旋叶片,外径为 464 mm,螺距为 200 mm,以实现透过筛孔的籽粒和轻杂物向中部气流清选室的集中,如图 8 所示。



图 8 圆筒筛三维模型

Fig. 8 Three-dimensional model of cylindrical sieve

2.3 横流风机结构参数设计

2.3.1 横流风机基本结构参数

横流风机具有结构简单、通过杂物能力强、沿整机宽度均匀配风等特点,目前在谷物联合收获机清选装置上应用较为广泛。本研究采用横流风机作为该清选装置中的吸杂风机,主要由叶轮和壳体等组成^[19],其主要结构如图 9 所示。

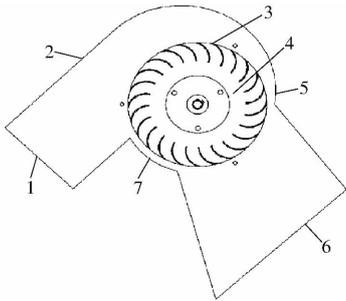


图 9 横流风机结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of cross-flow fan

1. 排气口 2. 壳体 3. 叶片 4. 叶轮 5. 底壳 6. 进气口
7. 舌部

由于横流风机结构特殊,加上其气流运动的非对称及复杂性,至今没有普遍公认的设计理论,其关键结构参数主要通过经验及试验值来确定。叶轮为多叶式,基本参数主要包括叶轮直径 D^* 、叶片角 β_2 和 β_1 、叶片数 Z 、内外径比 $2r/D^*$ 和叶轮轴直径 d^* 等,如图 10 所示。

综合考虑整机空间配置及清选效率等问题,最终确定该装置横流风机主要设计参数为:叶轮直径 260 mm、内外径比 0.7、叶片数 24、叶片进口安装角 90° 、叶片出口安装角 25° 、风机宽度 600 mm、蜗壳间隙 15 mm、舌部间隙 10 mm、叶轮轴直径 40 mm。

2.3.2 横流风机转速

为验证所设计的横流风机结构是否合理,通过

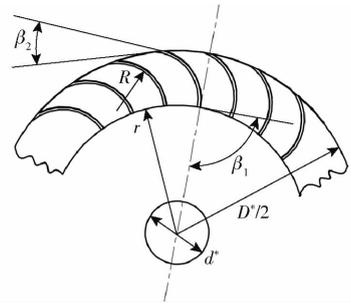


图 10 叶轮参数示意图

Fig. 10 Schematic of impeller parameters

建立横流风机的仿真模型探究该结构在不同转速下的气流场能否实现大白菜种子与轻杂物的分离^[20-21]。运用 SolidWorks 软件建立清选室型腔计算域模型,采用 STAR-CCM+ 软件对横流风机进行三维数值仿真,如图 11 所示。

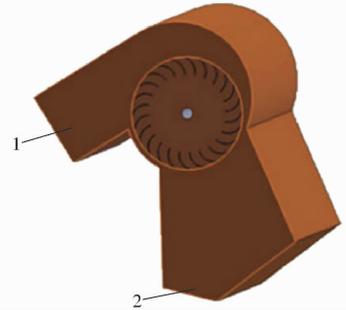


图 11 清选室型腔计算域模型

Fig. 11 Calculation domain model of cleaning chamber cavity

1. 出风口 2. 进风口

将清选室型腔计算域模型导入到 STAR-CCM+ 软件中进行迭代计算,分别得到横流风机转速为 500、600、700、800、900 r/min 时的仿真试验结果,如表 1 所示。

表 1 不同转速下仿真试验结果

Tab. 1 Simulation test results at different speeds

横流风机转速/($r \cdot \min^{-1}$)	清选室气流平均速度/($m \cdot s^{-1}$)
500	4.208
600	5.416
700	6.673
800	7.694
900	8.547

图 12 为横流风机转速为 700 r/min 时清选室气流场的速度矢量图。从仿真结果可知,叶轮旋转时,气流从叶轮敞开口处进入叶栅,穿过叶轮内部,另一面叶栅处排入蜗壳,形成工作气流;在叶轮外圆周上各点的气流速度不一致,越靠近蜗心,速度越大,越靠近蜗壳,速度越小;横流风机转速对气流速度影响较大,转速越大,气流速度越大。

大白菜种子脱出物各组分悬浮速度试验测定结果如表 2 所示,当横流风机转速不超过 700 r/min

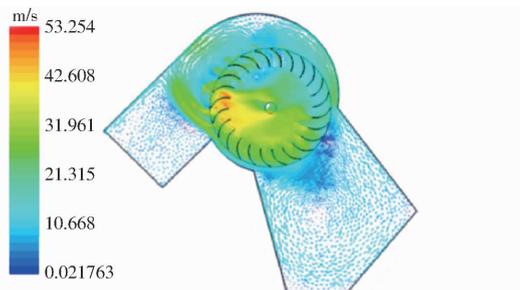


图 12 转速 700 r/min 时清选室气流场速度矢量云图
Fig. 12 Velocity vector cloud diagram of airflow field in cleaning chamber at 700 r/min

表 2 脱出物各组分悬浮速度

Tab. 2 Suspension speeds of exfoliates' components

脱出物组分	悬浮速度/($m \cdot s^{-1}$)
种子籽粒	7.43 ~ 7.52
轻杂物	3.15 ~ 3.24
角果壳	5.57 ~ 6.10
短茎秆	7.05 ~ 7.33

时,此时清选室气流平均速度大于轻杂及角果壳的悬浮速度但小于籽粒和短茎秆的悬浮速度,能够完成籽粒与轻杂物、角果壳等杂质的分离清选。

3 试验

3.1 试验材料

试验所用物料为大白菜种子脱出物,大白菜种子品种为早熟长江 5 号,经轴流钉齿式脱粒装置脱粒分离后收集脱出物,脱粒装置脱出物输出量为 0.8 kg/s,即分离清选装置喂入量为 0.8 kg/s。试验前测得适收期脱出物中籽粒、粗长杂余(短茎秆及角果壳)及轻杂余的含水率分别为 21.6%、35.1%、8.2%,质量之比为 2:3:1。

3.2 试验方法

试验开始前,将一定质量的脱出物均匀铺放在输送带上,留有 5 m 的加速区,调整内螺旋输送机、圆筒筛及输送带转速至试验要求值,启动电机,完成大白菜种子脱出物的喂入、分离、清选等过程,试验现场如图 13 所示。试验结束后分别收集两处接料箱的物料,人工筛选并称量,记总质量为 m_0 ,筛分其中的籽粒并称量,记为 m_2 ,每组试验重复 3 次取平均值。

影响大白菜种子分离清选装置试验台清选性能的试验因素为:内螺旋输送机转速、圆筒筛转速、横流风机转速,以含杂率和损失率为评价指标。其计算式为

$$Y_z = \frac{m_0 - m_2}{m_0} \times 100\% \quad (13)$$



图 13 分离清选装置试验现场

Fig. 13 Testing site of separation and cleaning device

$$Y_s = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (14)$$

式中 Y_z ——含杂率, %

Y_s ——损失率, %

m_1 ——喂入大白菜种子籽粒总质量, kg

4 试验结果与分析

4.1 单因素试验

4.1.1 内螺旋输送机转速

为进一步优选各试验因素参数水平,在固定圆筒筛转速为 40 r/min、横流风机转速为 700 r/min 的工况下,进行内螺旋输送机转速的单因素试验。内螺旋输送机转速分别设置为 80、100、150、200、250、300 r/min,试验结果如图 14 所示。

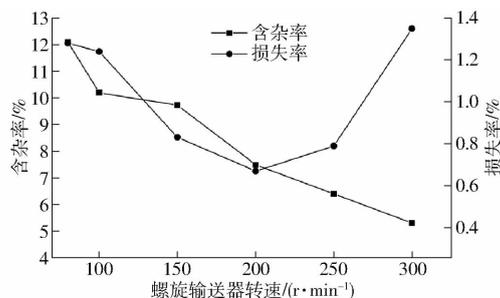


图 14 输送机转速对性能指标的影响

Fig. 14 Influence of auger speed on performance index

由图 14 可知,随着内螺旋输送机转速的增加,含杂率逐渐降低,原因为随着内螺旋输送机转速增加,螺旋叶片的线速度增加,物料轴向运动速度也增加,短茎秆等粗长杂余以及轻杂物透过筛孔的概率减小,导致进入清选室的杂物减少。

籽粒损失率呈先降后升趋势,在 200 r/min 时损失率最小,为 0.67%。输送机转速在 150 ~ 250 r/min 时,既满足物料的顺利输送,又使籽粒最大程度地透筛;输送机转速大于 250 r/min 时,籽粒未来得及透筛便随杂物一起由排草口排出机外,造成损失率增加;输送机转速小于 150 r/min 时,缺少对物料的抖动,籽粒夹杂在果荚壳中随杂物一起排出机外,造成夹带损失。

4.1.2 圆筒筛转速

在固定内螺旋输送机转速为 200 r/min、横流风机转速为 700 r/min 的工况下,进行圆筒筛转速的单因素试验。圆筒筛转速分别设置为 40、50、60、70、80、90 r/min,试验结果如图 15 所示。

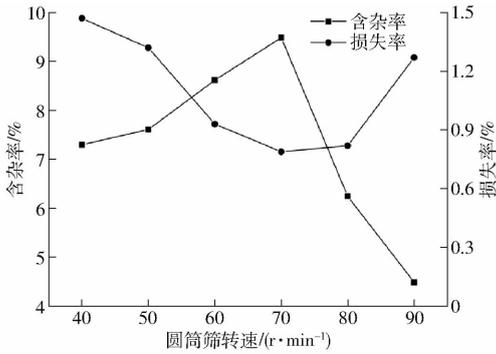


图 15 圆筒筛转速对性能指标的影响

Fig. 15 Influence of cylinder screen speed on performance index

由图 15 可知,随着圆筒筛转速增加,含杂率呈先升高后降低趋势,而损失率则先下降后上升。原因为当圆筒筛转速小于 70 r/min 时,随着圆筒筛转速增加,单位时间内圆筒筛筛分面积增大,籽粒及杂余透筛机率增大,籽粒损失率逐渐减小,进入清选室的杂余增多,含杂率升高。圆筒筛转速大于 70 r/min 时,籽粒及杂余与圆筒筛接触不充分,不易透筛,造成损失率升高,进入到清选室的杂余量减少,含杂率降低。

4.1.3 横流风机转速

固定内螺旋输送机转速为 200 r/min、圆筒筛转速为 40 r/min 下,进行横流风机转速的单因素试验。横流风机转速分别设置为 400、500、600、700、800、900 r/min,试验结果如图 16 所示。

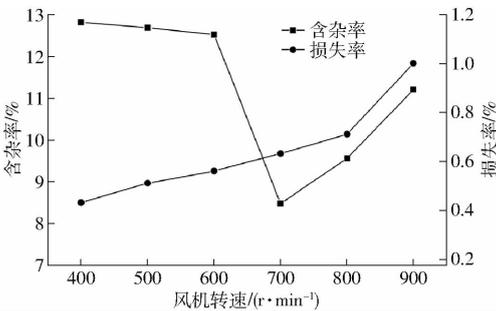


图 16 横流风机转速对性能指标的影响

Fig. 16 Influence of cross-flow fan speed on performance index

由图 16 可知,随着横流风机转速增大,大白菜种子的损失率逐渐升高,含杂率先降低后升高。原因为随着风机转速的增大,进气口处气流速度及气压增大,使得滑板上脱出物所受到的气流作用力增强,导致脱出物中悬浮速度较小的轻杂及籽粒更容

易被横流风机吸走,因此损失率逐渐增加;当滚筒转速小于 600 r/min 时,含杂率降低趋势不明显,表明此时风机所产生的风速无法实现籽粒及轻杂的良好分离;当转速超过 600 r/min 时,含杂率下降趋势明显且在 700 r/min 时达到最佳。随着风机转速进一步增加,被风机吸走的轻杂及籽粒量增加,但籽粒对含杂率影响较大,从而导致含杂率上升。

4.2 正交试验

根据单因素试验结果,选取圆筒筛转速、输送机转速、横流风机转速作为试验因素进行正交试验,试验因素水平如表 3 所示。试验方案及结果如表 4 所示。

由表 5 可知,各试验因素对含杂率 Y_z 影响主次

表 3 因素水平表

Tab. 3 Coding of factors and levels

水平	因素		
	圆筒筛转速/ (r·min ⁻¹)	输送机转速/ (r·min ⁻¹)	横流风机转速/ (r·min ⁻¹)
1	60	150	600
2	70	200	700
3	80	250	800

表 4 正交试验方案及结果

Tab. 4 Scheme and results of orthogonal test

试验号	A	B	C	含杂率/%	损失率/%
1	1	1	1	17.06	0.54
2	1	2	2	8.62	0.93
3	1	3	3	6.03	1.84
4	2	1	3	2.65	1.42
5	2	2	1	12.53	0.73
6	2	3	2	6.41	1.07
7	3	1	2	11.15	1.14
8	3	2	3	3.82	1.65
9	3	3	1	13.90	0.82

表 5 极差分析

Tab. 5 Results of range analysis

试验指标	A	B	C	
含杂率 Y_z	k_1	10.570	10.2867	14.4967
	k_2	7.1967	8.3233	8.7267
	k_3	9.6233	8.7800	4.1667
	R	3.3733	1.9634	10.3300
	较优水平	A_2	B_2	C_3
主次因素	C, A, B			
损失率 Y_s	k_1	1.1033	1.0333	0.6967
	k_2	1.0733	1.1033	1.0467
	k_3	1.2033	1.2433	1.6367
	R	0.1300	0.2100	0.9400
	较优水平	A_2	B_1	C_1
主次因素	C, B, A			

顺序依次是:横流风机转速、圆筒筛转速、输送机转速,较优参数值组合为 $A_2B_2C_3$;各试验因素对清选损失率 Y_5 影响主次顺序依次是:横流风机转速、输送机转速、圆筒筛转速,较优参数值组合为 $A_2B_1C_1$ 。

为探究3个试验因素对含杂率和损失率影响显著性,对正交试验结果进行显著性检验,结果如表6所示。由表6可知,横流风机转速对含杂率和损失率的影响均显著($P < 0.05$);输送机转速对含杂率和损失率的影响均不显著($P > 0.05$);圆筒筛转速对含杂率影响显著($P < 0.05$),对损失率影响不显著($P > 0.05$)。

表6 方差分析

Tab.6 Results of variance analysis

试验指标	试验因素	平方和	自由度	均方差	F	P
含杂率	A	18.164 3	2	9.082 1	20.162	0.005
	B	6.333 3	2	3.166 6	6.327	0.106
	C	160.795 4	2	80.398	169.647	0.002
损失率	A	0.027 8	2	0.013 9	5.235	0.124
	B	0.068 6	2	0.034 3	3.018	0.196
	C	1.354 2	2	0.677 1	70.204	0.012

由于各试验因素对含杂率和损失率的较优参数值组合不一致,需采用综合评分法对试验结果进行加权分析^[22-23]。含杂率隶属度 w_1 和损失率隶属度 w_2 计算式为

$$U = \frac{S - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (15)$$

式中 U ——指标隶属度 S ——指标值

S_{\min} ——指标最小值

S_{\max} ——指标最大值

将2个指标隶属度按照设定的加权因子转换成综合分数 w (表7)。实际生产中,含杂率和损失率要求不同,需优先保证损失率低,其次保证含杂率低,采取加权综合评分法时,选取含杂率加权因子为0.4,损失率加权因子为0.6,综合分数计算式为

表7 综合分数分析结果

Tab.7 Analysis results of comprehensive scores

试验号	A	B	C	w_1	w_2	w
1	1	1	1	1	0	0.400 0
2	1	2	2	0.414	0.30	0.345 6
3	1	3	3	0.234	1	0.693 6
4	2	1	3	0	0.677	0.406 2
5	2	2	1	0.685	0.146	0.361 6
6	2	3	2	0.261	0.408	0.349 2
7	3	1	2	0.590	0.462	0.513 2
8	3	2	3	0.080	0.854	0.544 4
9	3	3	1	0.781	0.215	0.441 4

$$w = 0.4w_1 + 0.6w_2 \quad (16)$$

由表8可知,各个试验因素对综合分数的影响由大到小为:横流风机转速、圆筒筛转速、输送机转速,较优参数组合为 $A_2B_2C_2$,即圆筒筛转速为70 r/min,输送机转速为200 r/min,横流风机转速为700 r/min。

表8 综合分数极差分析

Tab.8 Range analysis of comprehensive scores

试验指标	A	B	C	
综合分数	k_1	0.479 7	0.439 4	0.400 9
	k_2	0.366 7	0.416 4	0.396 7
	k_3	0.498 3	0.489 0	0.547 3
R	0.113 6	0.072 6	0.150 6	
较优水平	A_2	B_2	C_2	
主次因素	$C、A、B$			

4.3 验证试验

表9为大白菜种子分离清选装置的验证试验结果,在较优水平组合条件下,含杂率平均值为2.75%,损失率平均值为0.62%,清选效果良好,满足行业相关标准。

表9 验证试验结果

Tab.9 Results of verification test %

试验号	含杂率	损失率
1	2.52	0.58
2	2.81	0.62
3	2.92	0.66
平均值	2.75	0.62

5 结论

(1)针对大白菜种子机械化收获需求,设计了一种适于大白菜种子滚筒脱出物的圆筒筛配横流风机的分离清选装置。该装置将内螺旋输送机安装于圆筒筛内部,实现了脱出物中粗长杂余和籽粒的分离,采用横流风机吸除经分离后混合物中的轻杂余,能够满足大白菜种子收获分离清选需要。

(2)对关键零部件的结构及运动参数进行了计算分析,确定了内螺旋输送机、圆筒筛等部件的关键结构参数及合理转速范围;通过STAR-CCM+软件对横流风机清选室气流场进行三维数值仿真,验证了所设计横流风机结构的合理性,为横流风机转速参数范围的选择提供了依据。

(3)通过单因素试验确定了圆筒筛、内螺旋输送机及横流风机转速的较优水平范围;通过正交试验确定了清选装置清选性能指标的影响由大到小为:横流风机转速、圆筒筛转速、输送机转速;采用综合评分法优化选取该分离清选装置的最优参数组合

为:圆筒筛转速 70 r/min,输送机转速 200 r/min,横过验证试验得到该分离清选装置的含杂率为
流风机转速 700 r/min。在较优参数组合条件下,通 2.75%,损失率 0.62%,满足行业相关标准。

参 考 文 献

- [1] 方智远. 中国蔬菜育种科学技术的发展与展望[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 12-18.
FANG Zhiyuan. Development progress and future perspectives of vegetable breeding sciences and technologies in China[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 12-18. (in Chinese)
- [2] 肖体琼, 何春霞, 陈巧敏, 等. 基于机械化生产视角的中国蔬菜成本收益分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 75-82.
XIAO Tiqiong, HE Chunxia, CHEN Qiaomin, et al. Cost-benefit analysis of vegetable production based on agricultural mechanized production[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 75-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150512&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.012. (in Chinese)
- [3] 朱明, 陈海军, 李永磊. 中国种业机械化现状调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 1-7.
ZHU Ming, CHEN Haijun, LI Yonglei. Investigation and development analysis of seed industry mechanization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 1-7. (in Chinese)
- [4] 邱燃, 李博, 邓宇, 等. 大白菜机械化收获技术现状与研究分析[J]. 农机使用与维修, 2016(1): 10-12.
QIU Ran, LI Bo, DENG Yu, et al. Actuality and research analysis of chinese cabbage mechanized harvesting technology[J]. Agricultural Mechanization Using & Maintenance, 2016(1): 10-12. (in Chinese)
- [5] 宗望远, 廖庆喜, 黄鹏, 等. 组合式油菜脱粒装置设计与物料运动轨迹分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 41-46.
ZONG Wangyuan, LIAO Qingxi, HUANG Peng, et al. Design of combined rape threshing device and analysis of rape cane movement trail[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 41-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s209&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.009. (in Chinese)
- [6] 李耀明, 唐忠, 李洪昌, 等. 风筛式清选装置筛面气流场试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 80-83.
LI Yaoming, TANG Zhong, LI Hongchang, et al. Experiment on the flow field of the air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 80-83. (in Chinese)
- [7] 陈立, 廖庆喜, 宗望远, 等. 油菜联合收获机脱出物空气动力学特性测定[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 125-130.
CHEN Li, LIAO Qingxi, ZONG Wangyuan, et al. Aerodynamic characteristics measurement of extraction components for rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 125-130. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s25&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.025. (in Chinese)
- [8] 陈翠英, 王志华, 李青林. 油菜脱出物物理机械特性及振动筛参数优化[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 60-63, 70.
CHEN Cuiying, WANG Zhihua, LI Qinglin. Mechanophysical properties of rape extractives and parametrical optimization of vibration sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 60-63, 70. (in Chinese)
- [9] ALI M, SHAMSOLLAH A, ASGHAR M, et al. Intelligent modeling of material separation in combine harvester's thresher by ANN[J]. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 2012, 4(23): 1767-1777.
- [10] 李海同, 万星宇, 王华, 等. 油菜联合收获机集成式纵轴流脱离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 108-116.
LI Haitong, WAN Xingyu, WANG Hua, et al. Design and experiment on integrated longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 108-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170513&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.013. (in Chinese)
- [11] 廖庆喜, 万星宇, 李海同, 等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 24-31.
LIAO Qingxi, WAN Xingyu, LI Haitong, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 24-31. (in Chinese)
- [12] 黄震宇, 李腾, 喻志成, 等. 蔬菜种子风力筛选机分离室气固两相流模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 70-76.
HUANG Zhenyu, LI Teng, YU Zhicheng, et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flows in separation chamber of air-screening machine for vegetable seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 70-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160510&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.010. (in Chinese)
- [13] 李方. 切纵流联合收割机清选装置性能试验及参数与结构优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- [14] 张敏, 金诚谦, 梁苏宁, 等. 风筛式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 8-15.
ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of

- rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 8-15. (in Chinese)
- [15] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27-35. WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 27-35. (in Chinese)
- [16] 王国欣. 圆筒式短茎秆清理装置试验研究及 CAD[D]. 洛阳: 洛阳工学院, 2000.
- [17] 王启阳, 吴文福, 朱浩天. 玉米螺旋式清选装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 12-19. WANG Qiyang, WU Wenfu, ZHU Haotian. Design and test of screw cleaning mechanism for corn[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20): 12-19. (in Chinese)
- [18] 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: 中国农业科学技术出版社, 2007: 965-966.
- [19] 邱先钧. 贯流风机在联合收割机中的应用及其设计[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 110-112. QIU Xianjun. Design and application of cross flow blower in combines[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 110-112. (in Chinese)
- [20] 余波, 王强, 王霜. 基于 Fluent 的风筛式清选室气流场的仿真[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 358-361. YU Bo, WANG Qiang, WANG Shuang. Simulation of air flow field in air screen cleaning chamber based on Fluent[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(7): 358-361. (in Chinese)
- [21] HE Y, GAO Q J. Analysis of the inherent frequency of circular vibrating screen and modelling and simulation of Matlab/Simulink[J]. Applied Mechanics & Materials, 2015(4113): 200-204.
- [22] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [23] 刘芳建, 杨学军, 方宪法, 等. 甘蔗收获机切段装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 90-95. LIU Fangjian, YANG Xuejun, FANG Xianfa, et al. Design and experiment of chopper device in sugarcane harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 90-95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.010. (in Chinese)

(上接第 169 页)

- [18] 刘向东, 王学农, 王春耀, 等. 差速式三通道鲜杏动态定向输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 35-43. LIU Xiangdong, WANG Xuenong, WANG Chunyao, et al. Design and test of apricot dynamic orientation and conveying device with 3-path differential belts[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 35-43. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161005&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.005. (in Chinese)
- [19] 章永年, 施印炎, 汪小岳, 等. 茎叶类蔬菜有序收获机柔性夹持输送机构设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(9): 48-51. ZHANG Yongnian, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Design on flexible clamping-conveying mechanism of orderly harvester for stems-leafy vegetables[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(9): 48-51. (in Chinese)
- [20] 北京起重运输机械研究所. DT II(A)型带式输送机设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [21] 施印炎, 陈满, 汪小岳, 等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 110-116. SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 110-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.015. (in Chinese)
- [22] 李常营. 留高茬式玉米收获机切割部件的仿生设计及其切割原理[D]. 长春: 吉林大学, 2014. LI Changying. Bionic blade of corn harvester for leaving high stubble and its cutting mechanism[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [23] 王金武, 白海超, 孙小博, 等. 水田喷雾机喷雾装置设计与动态分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 69-79. WANG Jinwu, BAI Haichao, SUN Xiaobo, et al. Design and dynamic analysis of spray device for paddy field sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 69-79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190307&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.007. (in Chinese)
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5262—2008 农业机械试验条件 测定方法的一般规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8097—2008 收获机械 联合收割机试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.