doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.013

燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置设计与试验

李心平　赵高源　姬江涛　王文哲

（河南科技大学农业装备工程学院，洛阳 471003）

摘要：为了解决燕麦清选装置清选性能低的问题，根据燕麦的物理特性对单风机三圆筒筛清选装置进行了结构改进，设计了一种燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置。在大圆筒筛上安装了能使物料跳起、充分分离的跳跃板结构，并且设计和加装了弧形栅格式挡板筛及复清选部件，对大圆筒筛的跳跃板及弧形栅格式挡板筛的清选原理及受力进行了理论分析。以离心风机转速、大圆筒筛转速、弧形栅格式挡板筛倾角为试验因素，燕麦籽粒含杂率和损失率为试验指标，进行了室内三元二次正交旋转组合试验。室内试验结果表明：当离心风机转速为 1 500 r/min、大圆筒筛转速为 110 r/min、弧形栅格式挡板筛倾角为 41°时，本装置清选效果最好，含杂率为 1.96%，损失率为 2.64%。田间验证试验结果表明，在最优参数下，含杂率为 1.97%，损失率为 2.68%。

关键词：燕麦；复清选；弧形栅格筛；田间试验

中图分类号：S226.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)05-0124-10　　**OSID**：

Design and Test of Cylinder Screen Oat Cleaning Device with Arc Grid Sieves and Re-cleaning

LI Xinping　ZHAO Gaoyuan　JI Jiangtao　WANG Wenzhe

(*College of Agricultural Equipment Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*)

Abstract: In order to reduce the problem of low cleaning performance of oats cleaning device, the structure of single fan three cylinder screen cleaning device was improved according to the physical characteristics of oats, and a cylinder screen oats cleaning device with arc grid screen re-cleaning was designed. A skip plate structure was installed on the large cylinder screen, which can make the material jump up and fully separate. The arc grid baffle screen and re-cleaning parts was designed and installed to reduce the impurity content and the entrainment loss. Based on the performance parameters of traditional single fan three cylinder screen cleaning device, the cleaning principle and function of skip plate of large cylinder screen and arc grid baffle screen was analyzed theoretically. Taking the rotating speed of centrifugal fan, the rotating speed of large cylinder screen and the angle of arc grid baffle screen as the experimental factors, and the impurity content and loss rate of oat grain as the experimental indexes, the indoor ternary quadratic orthogonal rotation combined test was carried out. The results showed that when the rotating speed of centrifugal fan was 1 500 r/min, the rotating speed of large cylinder screen was 110 r/min, and the angle of the arc grid baffle screen was 41°, the cleaning effect of the device was the best, the impurity content rate was 1.96%, and the loss rate was 2.64%. A field test was carried out. Under the optimum parameters, the impurity content rate was 1.97%, and the loss rate was 2.68%, which provided a reference for the optimization of the structure of the oat cleaning device and the improvement of the whole structure of oat combine harvester.

Key words: oat; re-cleaning; arc grid sieves; field test

收稿日期：2019-12-22　修回日期：2020-02-07

基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFD0701800)

作者简介：李心平(1973—)，男，教授，博士，主要从事农产品收获与加工机械研究，E-mail：aaalxp@126.com

通信作者：姬江涛(1965—)，男，教授，博士，主要从事智能化农业装备研究，E-mail：jjt0907@163.com

0　引言

燕麦收获是燕麦生产过程最重要的一环。我国的农业机械化发展主要集中在小麦、玉米和水稻三大粮食作物上，燕麦收获机械研究起步较晚，收获技术很不成熟，这严重影响了燕麦的发展[1-3]。目前，市面上没有专门针对燕麦收获的联合收获机，一些农民采用已有的谷物联合收获机收获燕麦，其清选含杂率和损失率均较高。

清选装置是燕麦机械化收获的重要部件[4-6]。现有的谷物清选装置多采用风筛式清选，风筛式清选一般采用离心风机、振动筛式清选装置[7-9]，但振动筛具有噪声大、结构复杂，成本高等缺点。此外，燕麦是高草谷比作物，平面振动筛容易堵塞，不适合燕麦的清选。圆筒筛具有转动平稳、噪声小、结构简单、湿分性能好等优点，因此又出现了风机、圆筒筛式清选装置[10-12]。尹健等[13]设计了一种由内筛筒和外圆筒组成、适合微型水稻联合收获机的新型圆筒筛，采用传动链实现物料的分离及流动，其结构紧凑，可以根据用户要求配置纯筛选或风筛式清选的圆筒筛，并给出了实现筛选最大最小转速的推导公式，但文中仅对新型圆筒筛进行了理论分析。BELLOCQ 等[14]分析了倾斜旋转筛筒对湿软结块物料的筛选效率，并对建模相关的工艺参数进行研究。薛然[15]对分级圆筒筛筛孔的大小及排列进行了设计，并通过 DEM 仿真试验确定最佳参数范围，优化了分级筛筒的结构及作业参数，提高了花生荚果的分级质量。刘师多等[16]分析了双风机圆筒筛清选机构的清选原理，测试了双风机圆筒筛清选机构在清选损失率为 0.19%、清洁率为 98.5% 和清选损失率为 4.9% 两种条件下的流场，指出流场的理想状态及提高清选性能的途径。但所建立的流场模型基于圆筒筛不影响双风机产生流场的假设，而清选室内流场的实际情况应是双风机及圆筒筛旋转产生的气流场的组合。万星宇等[17]研究设计了一种与旋风分离清选装置配合使用、可对油菜脱出物进行初步筛分的差速圆筒筛，此差速圆筒筛清选系统功耗低，但仍然存在含杂率及损失率较高的问题。

根据传统的单风机圆筒筛式燕麦清选装置的工作原理，物料先通过落料板落到大圆筒筛正上方，然后依次经过中、小圆筒筛，其落料面积较小，清选性能较差。物料在经过小圆筒筛时，因圆筒筛旋转运动产生的圆周惯性力，使本应被吹出的颖糠杂物由圆筒筛下方进入籽粒收集箱，大大增加了燕麦籽粒的含杂率；小圆筒筛末端未设置阻挡籽粒随杂物被吹走的部件或装置，大大增加了夹带损失。

为此，本文将圆筒筛与栅格筛相结合，设计一种燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置，该装置在传统单风机三圆筒筛清选装置基础上对大圆筒筛进行改进，提高筛分效率，又在其尾端增加弧形栅格式挡板筛以及复清选部件，以降低燕麦清选含杂率和损失率。

1　燕麦清选装置设计

1.1　工作原理与总体设计

燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置主要由脱粒滚筒、喂料口、离心风机、接料板、籽粒输送器、杂余水平输送器、弧形栅格式挡板筛、大中小圆筒筛、清选室上挡板、杂余升运输送器组成，如图 1 所示。工作时，物料从喂料口喂入，经脱粒滚筒脱粒后，长茎秆从出料口被排出机外，脱出物经落料板依次落在 3 个圆筒筛上进行清选，落在籽粒输送器中的干净籽粒被直接输送进粮箱，而从小圆筒筛筛尾落下的含杂较高的籽粒同被弧形栅格式挡板筛拦截筛选后的籽粒一起落在杂余水平输送器上，由其输送至杂余升运输送器，最终被输送到落料板，随脱出物一起进入清选室进行复清选。

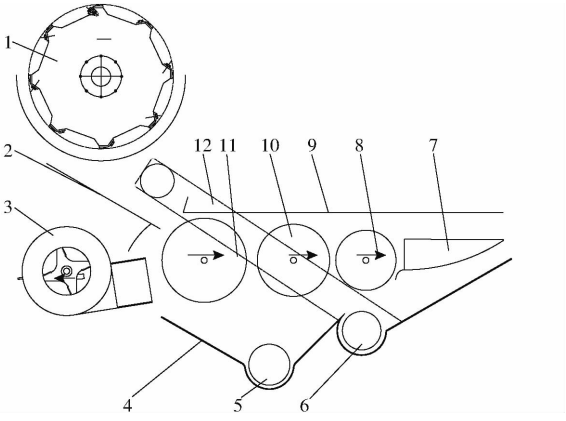

图 1　燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置简图

Fig. 1　Diagram of three cylinder screen oat cleaning device with arc grid sieves and re-cleaning

1. 脱粒滚筒　2. 喂料口　3. 离心风机　4. 接料板　5. 籽粒输送器　6. 杂余水平输送器　7. 弧形栅格式挡板筛　8. 小圆筒筛　9. 清选室上挡板　10. 中圆筒筛　11. 大圆筒筛　12. 杂余升运输送器

1.2　关键部件设计

1.2.1　三圆筒筛

传统单风机三圆筒筛清选装置工作时，由于物料湿度大，脱出物各组分间的粘结度大，筛分效率较低。另一方面，圆筒筛面与物料接触面为一条沿轴向的直线，接触面较小，脱出物分层效应不显著，导致脱出物紧贴大圆筒筛，在大圆筒筛的转动下直接向后移动到中圆筒筛，以致于大圆筒筛对清选起到的作用（使脱出物充分散开）较小，导致中圆筒筛、

小圆筒筛清选性能下降,不仅含杂率极高,还造成较大的夹带损失。因此,设计了一种带跳跃板的圆筒筛结构,改进的大圆筒筛及跳跃板尺寸参数如图 2 所示。在大圆筒筛筛面安装直角三棱柱形跳跃板,三角形斜边朝向脱出物运动方向。工作时,脱出物落在大圆筒筛跳跃板上,受到的斜向上力将物料打散,在离心风机作用下,各组分由于悬浮速度的不同而分开。

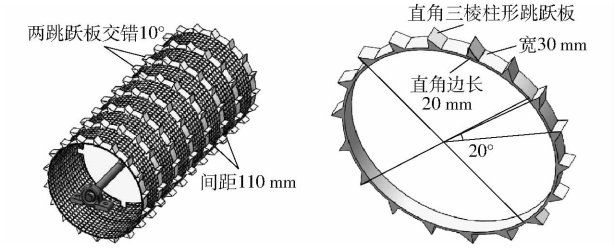

图 2 大圆筒筛及跳跃板结构简图

Fig. 2 Structure diagram of large cylinder sieve and jump plate

跳跃板的设计增大了大圆筒筛与脱出物的接触面积,将线接触变为面接触,增大了圆筒筛将脱出物向上抛掷角度,增加了脱出物在垂直及水平方向上的位移,改善分层效应,提高清选性能。跳跃板抛料角即跳跃板角应小于脱出物在大圆筒筛上的落料角,否则会起反作用。故设计跳跃板角为 45°。两跳跃板沿横向分布,要保证全部脱出物都充分散开的同时又不能阻碍风机气流对脱出物的作用。因为燕麦脱出物主要由籽粒、颖糠轻杂、茎秆组成,其中颖糠轻杂长度在 15 ~ 30 mm 范围内,茎秆长度在 20 ~ 130 mm 范围内,考虑燕麦脱出物同一组分及不同组分间的粘连,设计跳跃板宽度为 30 mm,同一轴面上设 18 个跳跃板均布排列,两跳跃板横向间距为 110 mm,并且交错放置。较短的籽粒和颖糠轻杂由单个跳跃板即可被抛起,较长的茎秆则需两个跳跃板的配合将其抛起,以利于后续的筛分。

1.2.2 弧形栅格式挡板筛

对于传统单风机三圆筒筛清选装置,第 3 个圆筒筛末端不存在任何阻挡夹带损失的部件或装置,故清选损失率较高。此外,由于小圆筒筛旋转时产生圆周惯性力,导致本应该被吹出的颖糠杂物由小圆筒筛下方经籽粒输送器进入粮箱,增大了燕麦籽粒的含杂率。

故在小圆筒筛尾端设计了弧形栅格式挡板筛,如图 3 所示。根据本装置尺寸,设计弧形栅格式挡板筛的整体尺寸(长 × 宽 × 高)为 806 mm × 220 mm × 220 mm。在弧形栅格式挡板筛上,气流方向始终相切于弧形表面,为使颖糠杂物沿弧面顺利排出机外,以及考虑到试验台整体尺寸,设计圆弧半径为 510 mm。根据燕麦物理特性,燕麦清选筛筛孔尺寸为 15 mm,筛丝直径为 2 mm,清选性能较好,又因弧形栅格式挡板筛在本清选装置尾端,清选负荷小,故设计弧形栅格式挡板筛两栅格间距为 12 mm,栅格厚度为 2 mm。为保证弧形栅格板拦截全部夹带损失,正对三圆筒筛方向应为一平面,故设计弧形栅格式挡板筛宽度为 20 mm。

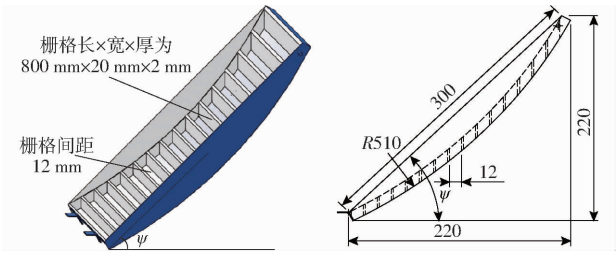

图 3 弧形栅格式挡板筛结构简图

Fig. 3 Brief diagram of grille screen structure

1.2.3 复清选部件

考虑到从小圆筒筛尾端落下的籽粒以及经过弧形栅格式挡板筛被回收的籽粒含杂率较高,需在小圆筒筛及弧形栅格式挡板筛下方设置复清选部件,将这两部分收集起来输送回落料板进行复清选。复清选部件主要由杂余水平输送器和杂余升运输送器两部分组成。工作时杂余水平输送器将杂余输送至杂余升运输送器,由其输送至落料板与脱出物一起进行清选。试验台喂入量为 1.5 kg/s,参考几种中小型联合收获机输送部件的结构参数[18],设计水平杂余输送器和杂余升运输送器主要尺寸相同,如图 4 所示,即可对杂余顺利进行复清选。

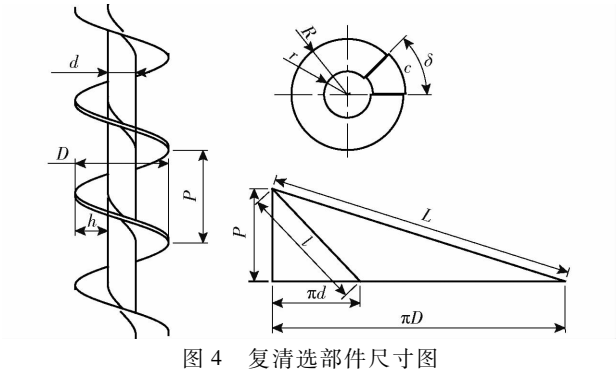

图 4 复清选部件尺寸图

Fig. 4 Machining dimension drawing of re-cleaning components

图 4 涉及的计算公式为

$$h = \frac{D - d}{2} \tag{1}$$

$$l = \sqrt{(\pi d)^2 + P^2} \tag{2}$$

$$L = \sqrt{(\pi D)^2 + P^2} \tag{3}$$

$$r = \frac{lh}{L - l} \tag{4}$$

$$R = r + h \tag{5}$$

$$\delta = 360\left[1 - \frac{L}{2\pi(r+h)}\right] \tag{6}$$

$$c = 2(r+h)\sin\frac{\delta}{2} \tag{7}$$

式中　d——轴直径，mm

D——叶外径，mm

P——导程，mm

h——叶宽，mm

l——内螺旋线实长，mm

L——外螺旋线实长，mm

r——内圆半径，mm

R——外圆半径，mm

δ——切缺角，(°)

c——切口弦长，mm

1.2.4　其余相关参数

燕麦清选装置其余关键部件相关参数[12]如表 1 所示。

表 1　燕麦清选装置各部件参数

Tab. 1　Parameters of oat cleaning device

参数	数值
脱粒滚筒外径/mm	540
脱粒滚筒长度/mm	1 285
离心风机直径/mm	200
离心风机倾角/(°)	10
三圆筒筛筛孔宽度/mm	12
大圆筒筛直径/mm	350
中圆筒筛直径/mm	300
小圆筒筛直径/mm	250
大、中圆筒筛间隙/mm	40
中、小圆筒筛间隙/mm	20

2　物料运动及受力分析

2.1　跳跃板作用理论分析

对大圆筒筛及其跳跃板的可行性进行理论分析[19]，如图 5、6 所示，对燕麦脱出物在大圆筒筛面抛出后的状态进行受力分析，得

$$mg - p\sin\beta = ma_y \tag{8}$$

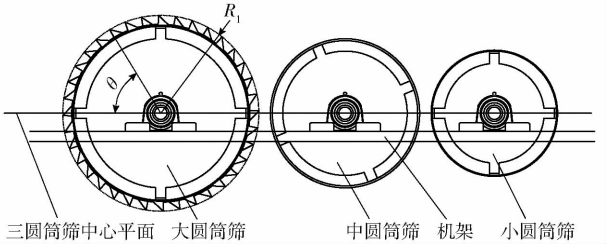

图 5　三圆筒筛清选部件分布图

Fig. 5　Three-cylinder screen cleaning parts distribution diagram

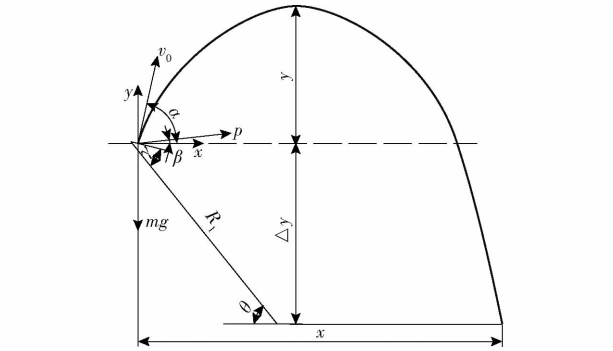

图 6　燕麦脱出物抛掷状态位移示意图

Fig. 6　State displacement of oat ejector thrown

$$p\cos\beta = ma_x \tag{9}$$

$$mg > p\sin\beta \tag{10}$$

$$p = mk_p\xi^2 = \frac{mg\xi^2}{v_p^2} \tag{11}$$

$$G = mg \tag{12}$$

式中　m——脱出物质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

p——物料所受风力，N

β——风力方向与水平面的夹角，(°)

a_y——垂直方向加速度，m/s^2

a_x——水平方向加速度，m/s^2

G——重力，N

k_p——物料漂浮系数，m^{-1}

ξ——气流相对于质点的相对速度，m/s

v_p——物料漂浮速度，m/s

燕麦脱出物在水平与垂直方向的距离分别为

$$y = \frac{v_0^2\sin^2\alpha}{2a_y} \tag{13}$$

$$\Delta y = R_1\sin\theta \tag{14}$$

$$x = v_0\cos\alpha\frac{\sqrt{v_0^2\sin^2\alpha + 2\Delta y a_y}}{a_y} + \frac{1}{2}a_x\frac{v_0^2\sin^2\alpha + 2\Delta y a_y}{a_y^2} \tag{15}$$

式中　y——从被抛起到同一水平面时脱出物的竖直位移，m

v_0——脱出物抛起时初速度，m/s

α——脱出物速度与水平方向夹角，(°)

Δy——脱出物与大圆筒筛中心平面间的距离，m

R_1——大圆筒筛半径，m

θ——物料在大圆筒筛上的落料角，(°)

x——从被筛面抛起到落在中心平面时脱出物的水平位移，m

整理得

$$y = \frac{v_0^2\sin^2(90° - \theta + \gamma)}{2g\left(1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}\right)} \tag{16}$$

$$x = v_0\cos(90° - \theta + \gamma)\cdot$$
$$\sqrt{\frac{v_0^2\sin^2(90° - \theta + \gamma)}{g^2\left(1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}\right)^2} + \frac{2R\sin\theta}{g\left(1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}\right)}} +$$
$$\frac{\xi^2\cos\beta}{2v_p^2}\left[\frac{v_0^2\sin^2(90° - \theta + \gamma)}{g\left(1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}\right)^2} + \frac{2R\sin\theta}{1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}}\right] \quad (17)$$

式中 γ——大圆筒筛跳跃板角,(°)

同理可得传统单风机三圆筒筛清选装置脱出物通过大圆筒筛时在垂直方向位移 y_{ct} 和水平方向位移 x_{ct} 为

$$y_{ct} = \frac{v_0^2\sin^2(90° - \theta)}{2g\left(1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}\right)} \quad (18)$$

$$x_{ct} = v_0\cos(90° - \theta)\cdot$$
$$\sqrt{\frac{v_0^2\sin^2(90° - \theta)}{g^2\left(1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}\right)^2} + \frac{2R\sin\theta}{g\left(1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}\right)}} +$$
$$\frac{\xi^2\cos\beta}{2v_p^2}\left[\frac{v_0^2\sin^2(90° - \theta)}{g\left(1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}\right)^2} + \frac{2R\sin\theta}{1 - \frac{\xi^2\sin\beta}{v_p^2}}\right] \quad (19)$$

对于大部分燕麦籽粒、颖糠、茎秆,由于颖糠、茎秆、燕麦籽粒悬浮速度 v_p 由小到大依次为颖糠、茎秆、籽粒,故三者在垂直方向位移由大到小为颖糠、茎秆、籽粒,水平方向位移由大到小为颖糠、茎秆、籽粒。对于同一组分脱出物,因为 $0° < \alpha = 90° - \theta + \gamma < 90°$,$0° < \gamma < \theta$,故 $\sin(90° - \theta + \gamma) > \sin(90° - \theta)$,有 $y > y_{ct}$。与传统单风机三圆筒筛清选装置相比,弧形栅格筛复清选式清选装置脱出物在垂直方向上的位移更大,能更好地将脱出物各成分分散开,便于清选。

2.2 大圆筒筛临界转速的计算

根据三圆筒筛清选装置的清选原理,脱出物是通过在三圆筒筛上的多次跳跃、分层,最终完成清选。当脱出物对圆筒筛的正压力 N 为 0 时,脱出物从圆筒筛上跳起,本文以大圆筒筛为例,研究脱出物在大圆筒筛上跳跃的临界条件,以确定大圆筒筛的转速范围,作为试验依据。对燕麦籽粒与大圆筒筛接触的瞬间受力分析如图 7 所示。

燕麦籽粒与大圆筒筛接触瞬间受力公式为

$$mg\cos(\theta - \gamma) = p\sin(\theta - \gamma + \beta) + N + G^*\sin\gamma \quad (20)$$

其中
$$G^* = \frac{mv_1^2}{R_1} \quad (21)$$

$$\frac{mv_1^2}{R_1} = \frac{\cos(\theta - \gamma)}{\sin\gamma} - \frac{\xi^2\sin(\theta - \gamma + \beta)}{v_p^2\sin\gamma} \quad (22)$$

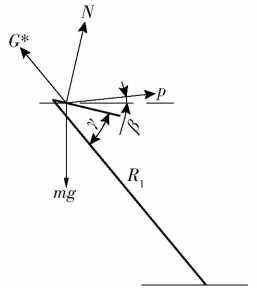

图 7 燕麦籽粒与大圆筒筛接触的瞬间受力分析

Fig. 7 Instantaneous stress analysis diagram of oat grain in contact with large cylinder sieve

式中 G^*——系统惯性力,N

v_1——大圆筒筛线速度,m/s

联立各式可得

$$\frac{v_1^2}{gR_1} = \frac{\cos(\theta - \gamma)}{\sin\gamma} - \frac{\xi^2\sin(\theta - \gamma + \beta)}{v_p^2\sin\gamma} \quad (23)$$

式中,$g = 9.8$ m/s^2、$R_1 = 0.175$ m、$\gamma = 45°$、$\beta = 10°$,落料角 θ 取最小值 45°、气流相对速度 ξ 取离心风机出风口气流速度 9 m/s[20-21]、物料漂浮速度 v_p 取最大值 11 m/s,代入式(2)得 $v_1 = 1.48$ m/s。由 $n = \frac{60v_1}{2\pi R_1}$ 得大圆筒筛临界转速为 81 r/min。

3 室内台架试验

3.1 试验条件

选取有代表性的坝莜 1 号燕麦品种,统计了与清选性能相关的主要物理特性参数[22],见表 2。试验所用燕麦及弧形栅格筛复清选式圆筒筛燕麦清选装置如图 8、9 所示。根据燕麦的物理特性参数,将待试验物料洒上适量水,放置 1 ~ 2 d,用物料水分测量仪测得其茎秆含水率为 32%,籽粒含水率为 24%。在室内做了弧形栅格筛清选式圆筒筛清选装置性能试验,并进行了回归正交旋转组合试验,得出最优试验参数组合[23-26]。

表 2 裸燕麦物理参数

Tab. 2 Physical parameters of bare oats

参数	数值
籽粒悬浮速度/(m·s^{-1})	4.35 ~ 11.01
颖糠悬浮速度/(m·s^{-1})	0.62 ~ 1.71
茎秆悬浮速度/(m·s^{-1})	1.14 ~ 6.28
千粒质量/g	20.3 ~ 25.2
茎秆含水率/%	30.2 ~ 35.8
籽粒含水率/%	21.9 ~ 26.5
草谷比	2.236

3.2 试验结果

本装置主要工作部件有离心风机、三圆筒筛、弧形栅格式挡板筛及复清选部件 4 部分,其中复清



图 8　我国广泛种植的裸燕麦

Fig. 8　Naked oats widely grown in China

1. 小穗头　2. 小枝梗　3. 主茎秆　4. 叶片　5. 根

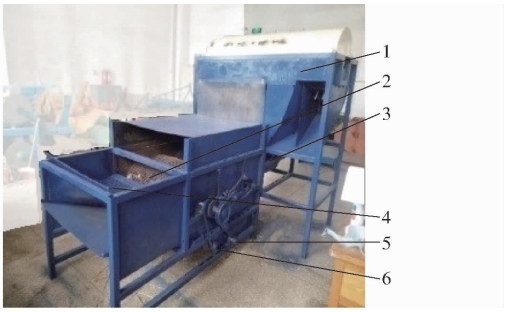

图 9　弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置实物图

Fig. 9　Physical image of cylinder screen cleaning device with arc grid sieves and re-cleaning

1. 脱粒滚筒　2. 三圆筒筛　3. 离心风机　4. 弧形栅格式挡板筛　5. 螺旋输送器　6. 复清选部件

选部件工作参数对本装置清选性能的影响较小，离心风机转速、三圆筒筛转速、弧形栅格式挡板筛倾斜角对本装置清选性能的影响较大。故选取离心风机转速 x_1、大圆筒筛转速 x_2 以及弧形栅格式挡板筛倾角 x_3 进行室内试验。室内试验喂入量为 1.5 kg/s。根据单因素试验结果确定因素编码如表 3 所示。每个水平重复 3 次，收集从籽粒输送器出来的籽粒，以及筛尾的所有颖糠轻杂，测算籽粒含杂率和损失率，取平均值。试验结果见表 4，z_1、z_2、z_3 为因素编码值。

表 3　试验因素编码

Tab. 3　Factor coding of regression orthogonal test

编码	因素		
	离心风机转速 x_1/(r·min^{-1})	大圆筒筛转速 x_2/(r·min^{-1})	挡板筛倾角 x_3/(°)
1.682	1 668	135	70
1	1 600	125	60
0	1 500	110	45
−1	1 400	95	30
−1.682	1 332	85	20

建立试验指标含杂率 y_1、损失率 y_2 与离心风机转速、大圆筒筛转速、挡板筛倾角之间的函数关系。

3.3　试验因素对试验指标影响的回归分析

3.3.1　试验因素对含杂率影响的回归分析

根据表 5 知 $F_1 = 0.522\,7 < F_{0.05}(7,6) = 4.21$，失拟项不显著，说明方程拟合显著。$F_2 = 443.552 > F_{0.05}(9,13) = 2.71$，说明回归方程显著。

表 4　试验方案与结果

Tab. 4　Test design and results

试验编号	z_1	z_2	z_3	含杂率 y_1/%	损失率 y_2/%
1	1	1	1	9.82	13.67
2	1	1	−1	6.23	8.10
3	1	−1	1	4.42	5.96
4	1	−1	−1	4.86	5.74
5	−1	−1	1	6.24	7.47
6	−1	−1	−1	7.35	9.34
7	−1	−1	1	6.20	7.54
8	−1	−1	−1	7.35	8.96
9	1.682	0	0	5.14	7.46
10	−1.682	0	0	4.44	6.22
11	0	1.682	0	7.70	8.66
12	0	−1.682	0	7.84	8.00
13	0	0	1.682	7.10	9.34
14	0	0	−1.682	4.96	6.22
15	0	0	0	2.18	3.06
16	0	0	0	1.74	3.24
17	0	0	0	2.16	2.37
18	0	0	0	2.08	2.78
19	0	0	0	2.28	3.15
20	0	0	0	1.86	2.50
21	0	0	0	2.04	2.62
22	0	0	0	1.82	3.12
23	0	0	0	2.10	2.36

表 5　含杂率方差分析

Tab. 5　Impurity content rate variance analysis

来源	自由度	离差平方和	均方	F
回归	9	131.355	14.595	$F_2 = 443.552$
剩余	13	0.427 76	0.032 9	
失拟	7	0.161	0.023	$F_1 = 0.522\,7$
误差	6	0.266		
总计	22	131.782		

各试验因素与含杂率回归方程为

$$y_1 = 2.032\,423\,9 + 0.212\,141\,1z_1 + 0.370\,634\,4z_2 + 0.625\,886\,3z_3 + 1.253\,152\,9z_1z_2 + 0.168\,871\,2z_1z_3 + 1.014\,757\,5z_2z_3 + 0.941\,804\,2z_1^2 + 1.829\,004\,6z_2^2 + 1.380\,102\,4z_3^2 \quad (24)$$

3.3.2　试验因素对损失率影响的回归分析

根据表 6 知 $F_1 = 1.117\,5 < F_{0.05}(7,6) = 4.21$，失拟项不显著，说明方程拟合显著。$F_2 = 128.961 > F_{0.05}(9,13) = 2.71$，说明回归方程显著。

各试验因素与损失率回归方程为

$$y_2 = 2.805\,15 + 0.541\,91z_1 + 0.505\,05z_2 + 0.953\,56z_3 + 1.794\,01z_1z_2 + 0.475\,48z_1z_3 + 1.319\,04z_2z_3 + 1.378\,27z_1^2 + 1.904\,94z_2^2 + 1.710\,53z_3^2 \quad (25)$$

表 6 损失率方差分析

Tab. 6 Loss rate variance analysis

来源	自由度	离差平方和	均方	F
回归	9	203.089	22.565 5	$F_2=128.961$
剩余	13	2.274 73	0.174 98	
失拟	7	1.287 33	1.287 33	$F_1=1.117\ 5$
误差	6	0.987 4	0.987 4	
总计	22	205.364		

3.4 双因素影响指标的效应分析

3.4.1 离心风机转速和大圆筒筛转速对燕麦清选性能的影响效应分析

令 $z_3=0$,得

$$y_1=2.032\ 423\ 9+0.212\ 141\ 1z_1+0.370\ 634\ 4z_2+1.253\ 152\ 9z_1z_2+0.941\ 804\ 2z_1^2+1.829\ 004\ 6z_2^2 \tag{26}$$

$$y_2=2.805\ 15+0.541\ 91z_1+0.505\ 05z_2+1.794\ 01z_1z_2+1.378\ 27z_1^2+1.904\ 94z_2^2 \tag{27}$$

由图 10 可知,当大圆筒筛转速的编码值在 $-1.682\sim-1$,即转速在 85 ~ 95 r/min 时,燕麦清选含杂率和损失率随着离心风机转速的增大而减小。因为大圆筒筛转速低,圆筒筛产生的系统惯性力小,燕麦脱出物不能充分分散开,筛分效率低。随着离心风机转速越来越大,在一定程度上促进了脱出物各成分的分离,提高清选装置的清选性能,因此含杂率、损失率随离心风机转速的增加而降低。当大圆筒筛转速的编码值在 $-1\sim1$,即转速在 95 ~ 125 r/min 时,燕麦清选含杂率和损失率随着离心风机转速的增大呈先减小后增大的趋势,但变化幅度不大。这是因为,当大圆筒筛转速在 95 ~ 125 r/min 内时,筛分效率有所提高,含杂率、损失率整体较低。离心风机转速过低时,脱出物分散不充分,部分颖糠轻杂不能被排出机外,而被排出机外的颖糠轻杂夹带较多籽粒,故含杂率、损失率都有所增大。离心风机转速过高时,被吹出机外的籽粒增多,使损失率增大。此外,脱出物在清选室的清选时间变短,从而含杂率升高。因此,燕麦清选含杂率和损失率随着离心风机转速的增大呈先减小后增大的趋势。当大圆筒筛转速的编码值在 1 ~ 1.682,即转速在 125 ~ 135 r/min 时,燕麦清选含杂率和损失率随着离心风机转速的增大而增大。这是因为,当大圆筒筛转速在 125 ~ 135 r/min 时,随着大圆筒筛转速的增大,会在圆筒筛表面形成较大负压,使得颖糠轻杂附着在圆筒筛表面,随着圆筒筛的转动跟籽粒一起落入输粮输送器,造成含杂率的增大,而吸附在圆筒筛表面的颖糠轻杂阻碍了籽粒的透筛,故极大地增加了损失率。随着离心风机转速越来越大,清选室内所产生的气流速度越来越大,脱出物受到的气流场力不断增加,脱出物在清选室的时间减少,含杂率增大,夹带损失也越来越多。

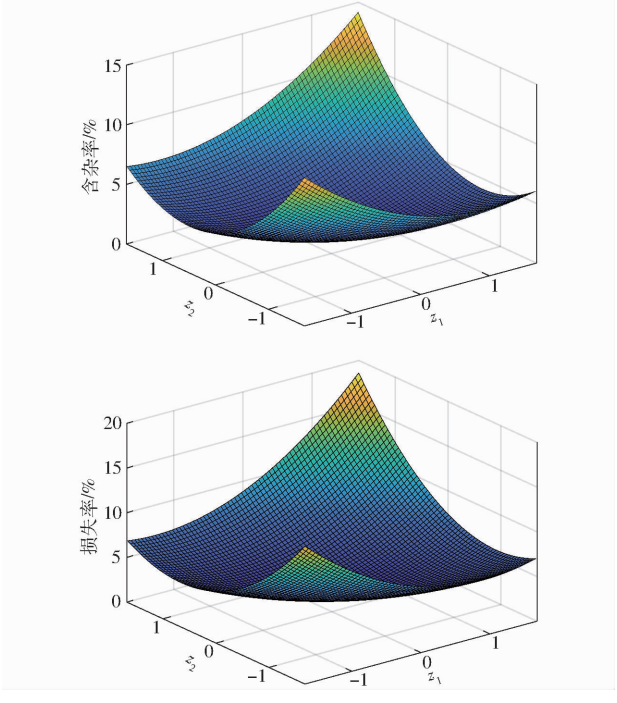

图 10 离心风机转速和大圆筒筛转速对清选性能的影响

Fig. 10 Effects of centrifugal fan speed and large cylinder screen speed on cleaning performance

3.4.2 离心风机转速和弧形栅格式挡板筛倾角对燕麦清选性能的影响效应分析

令 z_2 取 0 水平,得

$$y_1=2.032\ 423\ 9+0.212\ 141\ 1z_1+0.625\ 886\ 3z_3+0.168\ 871\ 2z_1z_3+0.941\ 804\ 2z_1^2+1.380\ 102\ 4z_3^2 \tag{28}$$

$$y_2=2.805\ 15+0.541\ 91z_1+0.953\ 56z_3+0.475\ 48z_1z_3+1.378\ 27z_1^2+1.710\ 53z_3^2 \tag{29}$$

由图 11 可知,当挡板筛倾角编码值在 $-1.682\sim1.682$,即倾角在 20° ~ 70°内时,燕麦清选含杂率和损失率随着离心风机转速增大呈现先减小后增大的趋势。这是因为,当离心风机编码值从 -1.682 增到 0,即转速从 1 332 r/min 增大到 1 500 r/min 时,清选室内气流场越来越强,脱出物各组分分层效率越来越高,处于上层的颖糠杂物被有效地吹出机外,含杂率越来越低。虽然大圆筒筛上安装了促进物料分层的跳跃板,但仅靠其使物料彻底分层还不够,当离心风机转速较低时,产生的气流速度低,分层不彻底,颖糠杂物中夹带的籽粒随着离心风机转速的降低而增加,即随着离心风机转速从1 332 r/min 增大到 1 500 r/min,籽粒损失率越来越低。当离心风机编码值从 0 增到 1.682,即转速从1 500 r/min 增大到 1 668 r/min 时,大圆筒筛附近

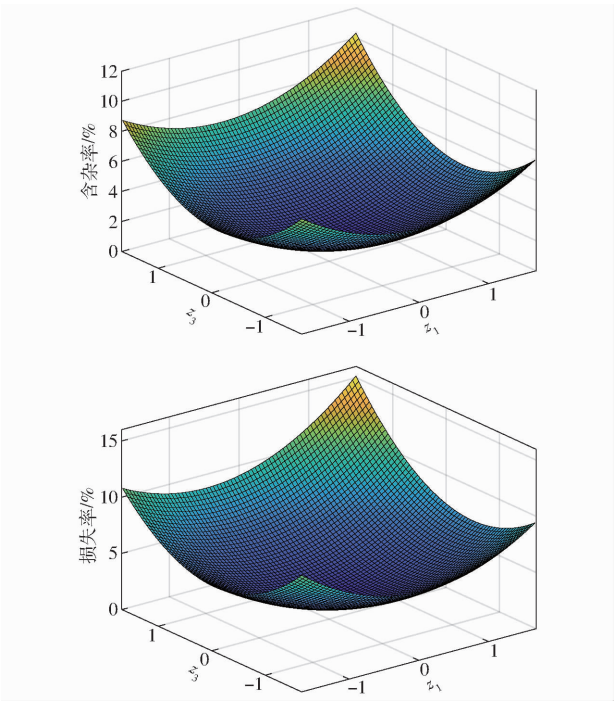

图 11　离心风机转速和挡板筛倾角对清选性能的影响

Fig. 11　Effects of centrifugal fan speed and baffle sieve inclination on cleaning performance

气流场的速度越来越大，燕麦籽粒所受风力随风速的增大而增大，最终直接越过大圆筒筛跟颖糠杂物一起向筛尾运动，降低大圆筒筛作用效果，同时也增加了中圆筒筛、小圆筒筛的清选负担，最终使得清选含杂率、损失率越来越高。

4　参数优化选取

将含杂率和损失率的回归方程按综合评价法进行拟合，含杂率和损失率以权重 0.5∶0.5 的比例相加，公式为

$$w = 0.5(y_1 - y_{1\min})/(y_{1\max} - y_{1\min}) + 0.5(y_2 - y_{2\min})/(y_{2\max} - y_{2\min}) \quad (30)$$

4.1　离心风机最佳转速和大圆筒筛最佳转速

联立式(26)、(27)、(30)，另由表 4 知 $y_{1\min}$ = 1.74%、$y_{1\max}$ = 9.82%、$y_{2\min}$ = 2.36%、$y_{2\max}$ = 13.67%，得

$$w_1 = 0.037\,775 + 0.037\,084\,7z_1 + 0.045\,262\,9z_2 + 0.156\,857\,4z_1z_2 + 0.119\,211\,4z_1^2 + 0.197\,395\,8z_2^2 \quad (31)$$

由图 12 可知，当离心风机转速编码值为 0(转速为 1 500 r/min)，大圆筒筛转速编码值为 0(转速为 110 r/min)时，评价值 w_1 有最小值，故选取离心风机转速为 1 500 r/min，大圆筒筛转速为 110 r/min。

4.2　弧形栅格式挡板筛最佳倾角

同理，将 $z_1 = 0$，$z_2 = 0$ 代入权重拟合公式，得

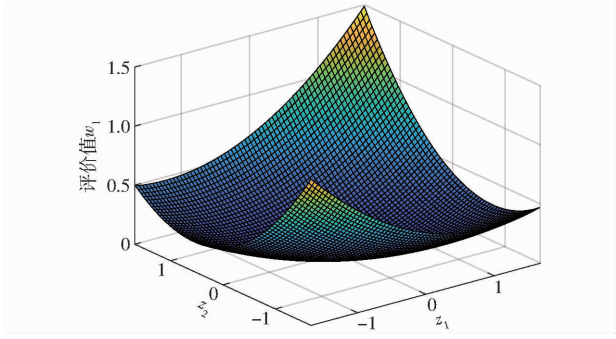

图 12　清选性能评价值 w_1

Fig. 12　Value of cleaning performance w_1

$$w_2 = 0.377\,75 + 0.080\,886\,2z_3 + 0.161\,022\,6z_3^2 \quad (32)$$

由图 13 可知，当弧形栅格式挡板筛倾角的编码值在 −0.3 ~ −0.2，即倾角在 40.5° ~ 42°范围内，评价值 w_2 有最小值，故选取挡板筛倾角 41°。

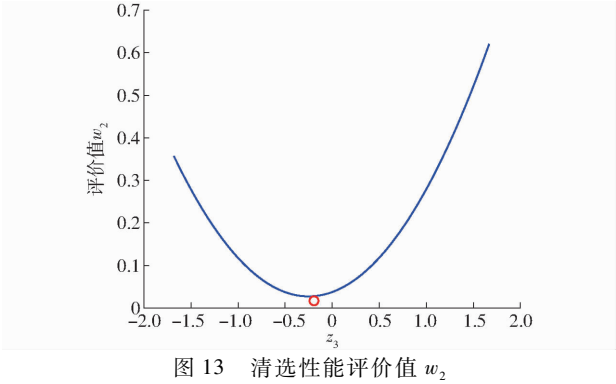

图 13　清选性能评价值 w_2

Fig. 13　Value of cleaning performance w_2

在清选试验台各工作参数、结构参数一定的条件下，选取离心风机转速为 1 500 r/min、大圆筒转速为 110 r/min、弧形栅格式挡板筛倾角为 41°进行室内试验，得到含杂率为 1.96%，损失率为 2.64%，清选性能得到提高。

5　田间试验验证

2018 年 8 月在山西省朔州市右玉县进行了田间验证试验，如图 14 所示，将所设计的燕麦清选装置装配在联合收获机上进行田间验证试验。燕麦品种为坝莜 1 号，种植方式为机直播，行间距为 250 mm，籽粒含水率为 25%，茎秆含水率为 34%。联合收获机割幅 2 m，割茬高 200 mm，机组前进速度为 360 m/h，喂入量为 1.5 kg/s。离心风机转速、大圆筒筛转速、弧形栅格式挡板筛倾角分别为 1 500 r/min、110 r/min、41°，中、小圆筒筛转速确定为58 r/min。选取燕麦植株性状较好的区域进行田间试验，每次试验前先清理清选室以确保前一次的试验不对下一次试验造成影响。试验时，收集从筛尾排出的颖糠杂物，以及从籽粒输送器输出的籽

粒,将两者进行筛分称量,计算籽粒的含杂率及损失率。25 m 设置一标杆,联合收获机每前进 25 m 收集一次,总共收集 3 次,计算出平均含杂率为 1.97%,平均损失率为 2.68%。



图 14 田间试验验证

Fig. 14 Field test validation

6 结论

(1)设计了一种燕麦弧形栅格筛复清选式三圆筒筛清选装置,在大圆筒筛上安装了能使物料跳起、充分分离的跳跃板结构,提高筛分效率,降低含杂率、损失率。

(2)在圆筒筛清选装置上加装了复清选部件及弧形栅格式挡板筛,增加杂余输送器,将小圆筒筛及其后落下的籽粒输送回落料板进行再次清选。挡板筛能有效拦截夹带籽粒,对其进行回收筛选,提高了清选性能。

(3)建立了离心风机转速、大圆筒筛转速、弧形栅格式挡板筛倾角与本装置清选性能间的三元二次回归数学模型,拟合度较高。

(4)燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置融合了振动筛清选装置的优点,室内试验表明燕麦清选含杂率降低到 1.96%,损失率降低到 2.64%。说明弧形栅格式挡板筛和复清选部件的设计对燕麦清选装置清选性能的提高起到了积极作用。

(5)田间验证试验表明,当离心风机转速为 1 500 r/min、大圆筒筛转速为 110 r/min、弧形栅格式挡板筛倾角为 41°时,燕麦籽粒含杂率为 1.97%,损失率为 2.68%。

参 考 文 献

[1] 赵世锋,田长叶,王志刚,等. 我国燕麦生产和科研现状及未来发展方向[J]. 杂粮作物,2007,27(6):428 - 431.

[2] 姬江涛,李心平,金鑫,等. 特色杂粮收获机械化现状、技术分析及装备需求[J]. 农业工程,2016,6(6):1 - 3.
JI Jiangtao, LI Xinping, JIN Xin, et al. The present situation, technical analysis and equipment demand of characteristic grain harvesting mechanization [J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(6): 1 - 3. (in Chinese)

[3] 梁英,王丽香,姚素娟,等. 5 个燕麦品种不同收获期产量及营养品质的综合评价[J]. 山东农业科学,2016,48(9):49 - 53.
LIANG Ying, WANG Lixiang, YAO Sujuan, et al. Integrated evaluation on yield and nutritional quality of five oat varieties in different harvest time [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(9): 49 - 53. (in Chinese)

[4] 耿端阳. 新编农业机械学[M]. 北京:国防工业出版社,2015.

[5] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[6] 李骅,尹文庆,何文龙. 平面振动筛分装置气流场的数值模拟与试验[J]. 南京农业大学学报,2013,36(6):141 - 146.
LI Hua, YIN Wenqing, HE Wenlong. Simulation and test of the airflow field on the plane vibrating sieve[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(6): 141 - 146. (in Chinese)

[7] 陈霓,黄东明,陈德俊,等. 风筛式清选装置非均布气流清选原理与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(4):73 - 77.
CHEN Ni, HUANG Dongming, CHEN Dejun, at al. Theory and experiment on non-uniform air-flow cleaning of air-screen cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 73 - 77. (in Chinese)

[8] 李骅,张美娜,尹文庆,等. 基于 CFD 的风筛式清选装置气流场优化[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊 2):12 - 16.
LI Hua, ZHANG Meina, YIN Wenqing, at al. Optimization of airflow field on air-and-screen cleaning device based on CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 12 - 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2013s203&journal_id = jcsam. DOI: 10.6014/j.issn.1000-1298.2013.S2.003. (in Chinese)

[9] 王艳茹,王艳萍,李淑清. 试述种子加工设备[J]. 农机化研究,2002,24(2):171.

[10] 耿令新,孙成龙,左杰文,等. 燕麦籽粒揉搓式除杂装置设计[J]. 农业工程学报,2019,35(11):38 - 47.
GENG Lingxin, SUN Chenglong, ZUO Jiewen, et al. Design on oat-grains purification device with rubbing roller [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 38 - 47. (in Chinese)

[11] LAWINSKA K, REMIGIUSZ M. Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2017, 53(2): 812 - 828.

[12] 李心平,孟亚娟,张家亮,等. 辊搓圆筒筛式谷子清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):92 - 102,136.
LI Xinping, MENG Yajuan, ZHANG Jialiang, et al. Design and test of cleaning device for roller rubbing cylinder sieve of millet [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 92 - 102, 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181011&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-

1298.2018.10.011.(in Chinese)

[13] 尹健,黄年月,吴兵,等.微型水稻联合收割机新型圆筒筛设计研究[J].现代机械,2011(3):62－64,72.
YIN Jian,HUANG Nianyue,WU Bing,et al. Research on the design of new type rotary sieve for miniature rice combine harvester[J]. Modern Machinery,2011(3):62－64,72. (in Chinese)

[14] BELLOCQ B,RUIZ T,DELAPLACE G,et al. Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates[J]. Journal of Food Engineering,2017,195:235－246.

[15] 薛然.花生荚果圆筒筛筛分特性研究与参数优化[D].北京:中国农业科学院,2015.
XUE Ran. Experimental study and parameter optimization of cylinder screen for peanut pod[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2015. (in Chinese)

[16] 刘师多,王显仁,师清翔,等.双风机圆筒筛清选机构内流场的试验研究[J].中国农机化,2005,27(6):69－71.
LIU Shiduo, WANG Xianren, SHI Qingxiang, et al. Testing research on flow field of the two-fan cylinder screen cleaning mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2005,27(6):69－71. (in Chinese)

[17] 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 incleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(14):27－35. (in Chinese)

[18] 徐立章,李洋,李耀明,等.谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J/OL].农业机械学报,2019,50(10):1－16.
XU Lizhang,LI Yang,LI Yaoming,et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):1－16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20191001&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.001. (in Chinese)

[19] 王立军,冯鑫,武振超,等.玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):115－123.
WANG Lijun,FENG Xin,WU Zhenchao,et al. Design and test of stepped vibrating screen with cross air for maize harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):115－123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.013. (in Chinese)

[20] 童水光,沈强,唐宁,等.纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):135－142.
TONG Shuiguang,SHEN Qiang,TANG Ning,et al. Numerical simulation and optimization experiment of mixed flow field on longitudinal axial flow cleaning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):135－142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160719&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.019. (in Chinese)

[21] 陈霓,黄东明,张建荣.非均布气流清选风机的研究与应用[J].机电工程,2008,25(4):108－110.
CHEN Ni,HUANG Dongming,ZHANG Jianrong. Research and application of cleaning fan with non-uniformly distributed air flow[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2008,25(4):108－110. (in Chinese)

[22] 侯华铭,崔清亮,郭玉明,等.气吹式粮油作物脱出物清选悬浮速度测量装置设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(16):43－49.
HOU Huaming,CUI Qingliang,GUO Yuming,et al. Design and test of air-sweeping suspension speed testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 43－49. (in Chinese)

[23] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据分析[M].北京:化学工业出版社,2005.

[24] 辛益军.方差分析与试验设计[M].北京:中国财政经济出版社,2002.

[25] 田彦.回归分析法在实验数据处理中的应用[J].内蒙古工业大学学报(自然科学版),1995,14(3):57－62.
TIAN Yan. Application of regressive analysis in experimental data processing[J]. Journal of Inner Mongolia Versity of Technology (Natural Science),1995,14(3):57－62. (in Chinese)

[26] 邱立春,崔国才,王铁和.逐步回归分析方法在农机化系统分析中的应用[J].农业机械学报,1997,28(1):98－101.
QIU Lichun,CUI Guocai,WANG Tiehe. Application of the regression analysis method in the analysis of mechanization system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1997,28(1):98－101. (in Chinese)