

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.027

玉米清选装置结构优化设计与试验

栗晓宇 杜岳峰 牛兴成 迟瑞娟 毛恩荣

(中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对目前玉米籽粒直收机的清选装置存在籽粒损失率和含杂率偏高、传统试验受季节性影响大等问题, 基于CASE 4099型联合收获机清选系统, 搭建玉米脱粒清选试验平台, 设计了一种竖式可调节分风板, 并采用数学建模、仿真模拟和试验验证相结合的方法对清选装置作业性能进行优化。建立籽粒在振动筛上运动过程的数学模型, 分析了振动筛倾角、振幅、频率、振动方向角和风机风力与振动筛筛面夹角等因素与籽粒在振动筛上平均运动速度和移动距离的关系; 对清选装置内部流场风速分布进行仿真和试验, 仿真结果表明, 分风板左或右偏 18° 时, 流场中风速分布均匀, 在垂直方向上差值较小, 验证试验结果表明, 分风板右偏 18° 时流场内各测量点风速分布均匀, 适于籽粒与杂质分离, 清选效果较好; 以振动筛转速、风机转速为主要影响因素, 以籽粒损失率、含杂率为指标进行正交试验, 结果表明当振动筛曲柄转速为 275 r/min 、风机转速 900 r/min 为最优作业参数组合, 损失率和含杂率分别为 1.34% 、 1.66% 。

关键词: 玉米; 清选装置; 分风板; 有限元分析; 优化设计

中图分类号: S225.5⁺1; S226.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0233-10

Optimization Design and Experiment of Corn Cleaning Device

LI Xiaoyu DU Yuefeng NIU Xingcheng CHI Ruijuan MAO Enrong

(Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the demand of modern agricultural production, corn direct grain harvesting has become the inevitable way to achieve efficient harvest. Cleaning process as an important part of corn direct grain harvesting equipment affects the operation performance of whole machine. Aiming at the problems of high grain loss rate and impurity rate in cleaning mechanism of corn combine harvester, and seasonal influence on traditional test, the method of mathematical modeling, simulation and experiment verification were used to optimize the operation performance and the structure design of cleaning device. Based on cleaning system of CASE 4099 combine harvester, a corn threshing and cleaning test platform was built. The cleaning device mainly included upper sieve, lower sieve, tossing board, tail sieve, crank mechanism, fan, motor and so on. The vibrating sieve selected fish scale sieve and adopted double-layer asynchronous cleaning operation. The mathematical model of movement process of grain on vibrating sieve was established to obtain the change law of main factors affecting on the cleaning effect, and the change law of the average movement speed and movement distance of grain on vibrating sieve were analyzed considering factors such as inclination angel of vibrating sieve, amplitude of vibrating sieve, rotational speed of crank mechanism driving vibrating sieve, angle between vibrating direction of mixture and sieve surface, angle between wind force of fan and sieve surface. In order to improve the cleaning performance, a vertical adjustable air separated board was designed, mainly including support rod, adjusting rod and regulating handle, the internal flow field velocity distribution could be changed by adjusting inclination angle of air separated board, and optimized the performance of cleaning device. Based on corn threshing and cleaning test platform, the experiment was carried out. The flow field inside cleaning device was divided into three layers by boundary of vibrating sieve surface, each layer selected 20 (4 crosses \times 5 columns) wind speed measurement points for data collection. The computational fluid dynamics (CFD) simulation

收稿日期: 2020-07-22 修回日期: 2020-09-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700101)和国家自然科学基金项目(51805536)

作者简介: 栗晓宇(1994—),女,博士生,主要从事农业装备及其自动化研究,E-mail: lxy940724@qq.com

通信作者: 杜岳峰(1984—),男,副教授,博士生导师,主要从事农机装备数字化设计与自动控制技术研究,E-mail: dyf@cau.edu.cn

technology was used to determine the optimum inclination angle of air separated board slanted at left or right 18° , in this condition, the wind velocity distribution in flow field was uniform, the wind speed change in vertical direction was the smallest, it was advantageous to cleaning operation. To verify the effect of adjustable air separated board, the test results showed that wind speed at each measurement point was uniform distribution and longitudinal gradient of flow field was small when air separated board slanted at right 18° , which was consistent with simulation results. The orthogonal experiment was carried out with vibrating sieve rotation speed and rotation speed of drive motor of fan as main influencing factors, while grain loss rate and impurity rate as indexes. The results showed that when rotational speed of crank mechanism of vibrating screen was 275 r/min and rotation speed of drive motor of fan was 900 r/min as the optimal working parameter combination, the loss rate and impurity rate were 1.34% and 1.66%, respectively.

Key words: corn; cleaning device; air separated board; finite element analysis; optimization design

0 引言

中国是玉米种植面积最大的国家之一,2019年我国玉米播种面积4 126.69亿平方米,总产量达2.6万 $t^{[1]}$,随着国家对玉米需求逐年增加,实现玉米籽粒直收模式是必然趋势。清选是影响收获后籽粒损失率和含杂率的关键步骤^[2-5],选择恰当的清选方式是设计清选装置的重要前提,根据工作原理不同清选方法可分为风选、筛选和风筛式清选^[6],由于风筛式清选方式具有清洁率高、可靠性好、损失率低等优点,应用范围更为广泛。

为了不断提高联合收获机的清选装置性能,国内外研究人员进行了一系列研究。在结构设计方面,以美国 John Deere、CASE,德国 CLAAS 为代表的公司是农机装备领域的龙头企业,研制的联合收获机配备优良的清选系统,如 CASE 4000 系列玉米籽粒直收机采用贯流风机清选系统,波浪形鳍板沿轴向制造均匀的涡旋,能够形成大范围气流,最大风速可达 35 m/s;CLAAS LEXION 770 型玉米籽粒直收机的清选装置由双出风口多风道涡轮式、3 层振动筛和抖动板构成,其有效筛分总面积达到 6.2 m^2 ,风场分布均匀、速度梯降差异小;王启阳等^[7]设计了一种螺旋式清选装置,根据螺旋输送原理,利用螺旋输送机在脱出混合物运动过程中实现籽粒与杂质的分离,提高了玉米筛分效率;LIANG 等^[8]分析了负载对清选装置内部气流速度和体积分布以及风机内部总压力分布对气流的影响。程超等^[9]通过清选装置台架试验研究了清选筛运动参数对玉米芯轴堵筛规律,并得到了最优回归模型;王立军等^[10-13]对振动筛的材料属性、结构形式和工作参数进行了系统研究,设计了曲面筛、组合孔筛、聚氨酯橡胶筛等筛体,并提出各因素对清选效果的影响规律;樊晨龙等^[14]设计了一种双层异向独立振动筛,对籽粒在筛面上的运动规律进行分析,通过试验确定了曲柄转速、上下曲柄长度的最优组合,有效提高了清选装置

的性能;唐忠等^[15]采用风速仪对清选装置内流场进行测量,明确了风机转速和风道倾角对气流场分布规律的影响。

在研究方法方面,XU 等^[16]通过 CFD-DEM 耦合的方法对脱出物中颗粒、茎秆和轻杂质在气流场中的速度进行了分析研究;BADRETDINOV 等^[17]通过分析各个节点的坐标得到一种关于连杆结构的运动数学模型;李洋^[18]从物料在玉米清选装置中的运动情况出发,利用 CFD-DEM 耦合的方法,对玉米清选装置的参数进行深入分析;梁振伟^[19]提出一种双风口多风道风机和双层振动筛联动调控的清选方法,利用仿真技术较全面地研究了各项结构和工作参数的最优取值,并设计了损失率监控系统,降低籽粒损失率;张传根^[20]研究了贝壳筛的筛孔长度、筛孔高度和筛孔纵向间距等参数对振动筛筛分效率和籽粒清洁度的影响,并确定了最终的最优结构参数。

综上所述,对于清选装置的研究大多集中在筛体结构、多风道风机结构等方面,大多属于试验阶段,本文以降低清选损失率和含杂率,优化清选装置的性能为研究目标,通过理论分析获取筛分过程中玉米籽粒的运动规律,利用仿真技术和试验设计一种竖式可调节分风板,以期优化清选装置内部流场风速分布的均匀性。

1 材料与方法

1.1 玉米脱粒清选试验平台的结构

搭建的玉米脱粒清选试验平台由中国农业大学基于 CASE 4099 型联合收获机改制而成,用于玉米籽粒直收脱粒清选性能优化与试验,该平台主要包括果穗输送机构、螺旋喂入器、脱粒机构、清选装置、驱动电机和机架等,其中清选装置由上筛、下筛、抖动板、尾筛、曲柄机构、风机和电机等构成,可一次性完成果穗喂入、籽粒-果穗脱粒分离、清选筛分、籽粒收集等多道工序。试验平台结构如图 1a 所示,清选装置如图 1b 所示,主要技术参数如表 1 所示。

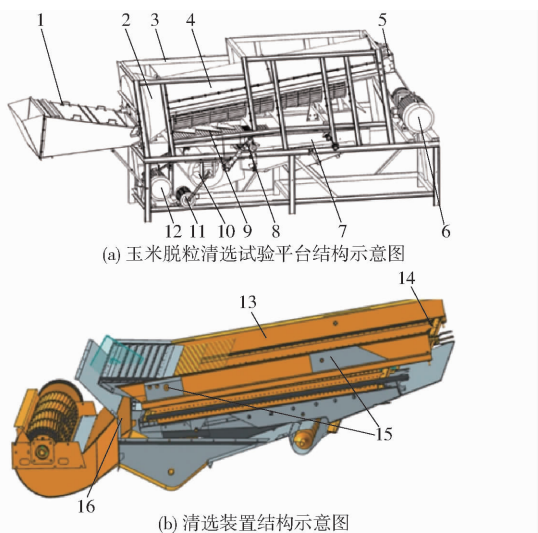


图 1 玉米脱粒清选试验平台及清选装置结构示意图
Fig. 1 Diagram of structure of corn threshing and cleaning test platform and cleaning mechanism

- 1. 果穗输送机 2. 螺旋喂入器 3. 机架 4. 脱粒机构 5. 联轴器 6. 脱粒滚筒驱动电机 7. 清选装置 8. 曲柄机构 9. 抖动板 10. 风机 11. 风机驱动电机 12. 曲柄驱动电机 13. 筛箱 14. 上筛 15. 曲柄机构安装位置 16. 风机风道

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
整机尺寸/(mm × mm × mm)	3 500 × 2 200 × 2 531
滚筒直径/mm	500
清选方式	风筛式
风机额定功率/kW	8
曲柄机构驱动电机额定功率/kW	14
上筛尺寸/(mm × mm)	124 × 96
下筛尺寸/(mm × mm)	124 × 96
尾筛尺寸/(mm × mm)	30 × 96
上筛筛片开度/mm	12
下筛筛片开度/mm	7

玉米脱粒清选试验平台由三相异步电机驱动,作业时果穗通过输送机构喂入至脱粒机构内,在脱粒元件和凹板冲击、碰撞作用下进行脱粒,与芯轴分离;脱粒后的混合物(损失籽粒、碎芯轴和杂质)经过凹板栅格落入清选装置,随曲柄机构带动双层异

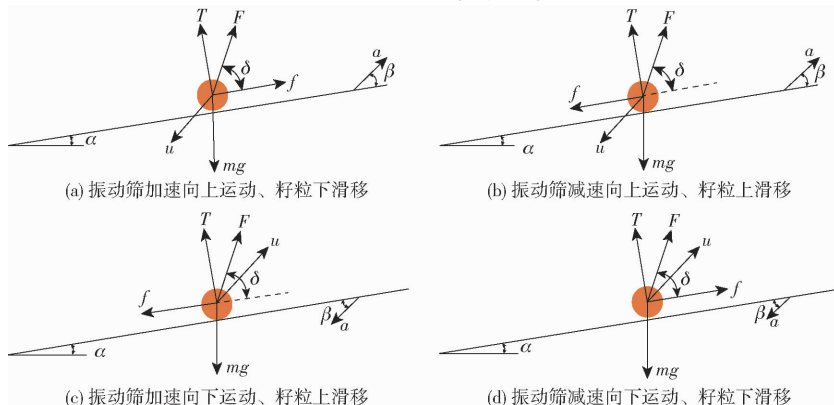


图 3 籽粒在振动筛不同运动状态下受力分析

Fig. 3 Force analysis of grain in different situations of sieve

步振动筛做往复运动,由于籽粒个体比其他杂质小,上筛(上鱼鳞筛)开度较大,对脱出混合物进行初步分离后可过滤大部分杂质,下筛(下鱼鳞筛)开度比上筛小,再次对混合物进行筛选后获得干净的籽粒;脱出混合物中籽粒漂浮速度为 12 ~ 16 m/s,碎芯轴和杂质等漂浮速度为 8 ~ 10 m/s^[21],设置合理的风机风速有助于混合物风选,干净的籽粒通过滑道进入集粮箱,碎芯轴和杂质在风机和振动筛作用下抛出机体外。

1.2 试验材料属性

试验样本选用玉米品种为郑单 958,是黄淮海地区主要种植品种,夏播生育期 96 d 左右,耐寒抗倒伏;该品种平均株高为 245 cm,结穗点平均高度为 113 cm;果穗平均长度为 17.1 cm,果穗上籽粒行数 15 ~ 18 行,行粒数 32 ~ 36 个;籽粒尺寸(长 × 宽 × 厚)约 6.3 mm × 3.4 mm × 5.6 mm,多数呈半马齿型,籽粒千粒质量平均值为 313 g。试验前利用含水率快速测量仪(浦运全智能谷物水分测量仪,0.1%)对玉米籽粒含水率进行测量,测得含水率约 28%,属于高含水率,如图 2 所示。

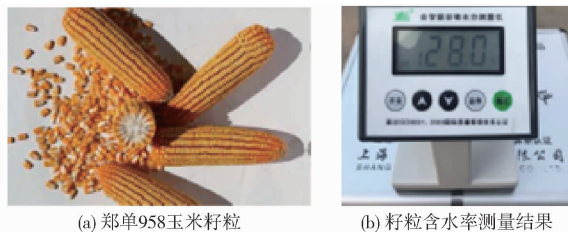


图 2 试验材料属性

Fig. 2 Properties of test material

2 玉米籽粒运动规律研究

玉米籽粒在振动筛筛面上的运动状态主要取决于籽粒位于筛面上的受力情况,不同时刻籽粒受到筛面不同作用力,受力大小和方向主要由振动筛筛面加速度大小和方向决定,籽粒在筛面上的 4 种运动状态如图 3 所示。

如图3a所示,振动筛加速向上运动时加速度 $a > 0$,此时籽粒受力情况为

$$\begin{cases} T = mg\cos\alpha + u\sin\beta - F\sin\delta \\ f = T\tan\varphi \quad (T \geq 0) \\ F_a = ma_a = |u|\cos\beta + f - F\cos\delta + mg\sin\alpha \end{cases} \quad (1)$$

当 $F_a > 0$ 时,籽粒处于下滑移状态,即相对于筛面向下运动;当 $F_a < 0$ 时,则籽粒相对于筛面处于静止状态;当 $T < 0$ 时,籽粒离开筛面处于抛掷状态。

如图3b所示,当振动筛减速向上运动时,籽粒在惯性作用下发生上滑移,此时振动筛加速度 $a < 0$,籽粒受到各力可表示为

$$\begin{cases} T = mg\cos\alpha - u\sin\beta - F\sin\delta \\ f = T\tan\varphi \quad (T \geq 0) \\ F_a = ma_a = |u|\cos\beta - f + F\cos\delta - mg\sin\alpha \end{cases} \quad (2)$$

图3c所示振动筛加速向下时籽粒由于惯性出现上滑移,籽粒受到各力作用为

$$\begin{cases} T = mg\cos\alpha + u\sin\beta - F\sin\delta \\ f = T\tan\varphi \quad (T \geq 0) \\ F_a = ma_a = |u|\cos\beta - f + F\cos\delta - mg\sin\alpha \end{cases} \quad (3)$$

如图3d所示,当振动筛减速向下运动,籽粒下滑移时,籽粒受力为

$$\begin{cases} T = mg\cos\alpha - u\sin\beta - F\sin\delta \\ f = T\tan\varphi \quad (T \geq 0) \\ F_a = ma_a = |u|\cos\beta - f + F\cos\delta - mg\sin\alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中 α ——振动筛倾角, ($^\circ$)
 β ——振动筛振动方向与振动筛筛面夹角, ($^\circ$)
 δ ——风机风力与振动筛筛面的夹角, ($^\circ$)
 m ——单个玉米籽粒质量, g
 F_a ——籽粒受力, N
 a_a ——籽粒作滑移运动时加速度, m/s^2
 g ——重力加速度, 9.8 m/s^2
 a ——振动筛加速度, m/s^2
 f ——振动筛与籽粒间摩擦力, N
 F ——籽粒所受风机风力, N
 T ——振动筛面对籽粒的支持力, N
 u ——玉米籽粒的振动惯性力, N

通过籽粒运动过程中的力学分析,建立玉米籽粒平均速度数学模型,反映清选装置的筛分效率。籽粒在振动筛筛面上的平均运动速度 v 可由籽粒在单位时间内上、下滑移距离表示,即

$$v = \frac{2\pi}{\omega} (|s_u| + |s_d|) \quad (5)$$

式中 s_u ——单个周期内玉米籽粒上滑移距离, m
 s_d ——单个周期内玉米籽粒下滑移距离, m
 ω ——振动筛曲柄角速度, rad/s

假设

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5] = [\alpha \ \beta \ r \ \omega \ \delta] \quad (6)$$

式中 r ——振动筛振动幅度, m

代入式(1)~(4)中籽粒受合力计算方程,得到

$$ma = u\cos x_2 \pm f + F\cos x_4 - mg\sin x_1 \quad (7)$$

其中惯性力 u 主要与振动筛运动状态有关,可表示为

$$u = m\omega^2 r \sin(\omega t) = mx_4^2 x_3 \sin(x_4 t) \quad (8)$$

籽粒与筛面间摩擦力 f 主要与振动筛对籽粒支撑力 T 有关,可表示为

$$f = (mg\cos x_1 - u\sin x_2 - F\sin x_5) \tan\varphi \quad (9)$$

籽粒收到风机风力 F 主要与籽粒受风面积和风速有关,可表示为

$$F = \frac{Sv_1^2}{1600} \times 10^3 \quad (10)$$

式中 S ——玉米籽粒的平均受风面积, mm^2

v_1 ——玉米籽粒表面处的风速, m/s

φ ——籽粒与筛面的摩擦角, ($^\circ$)

根据测得的籽粒平均面积, S 取 21.4 mm^2 ,参照一般联合收获机清选装置筛面风速, v_1 取 8 m/s ,由式(10)估算得到籽粒受风机风力 F 为 856 N 。当籽粒分别处于下滑移状态时和上滑移状态时的籽粒运动加速度 a_d 和 a_u ,联立式(1)~(10),可得

$$\begin{cases} a_d = x_4^2 x_3 \sin x_4 t \cos x_2 - g \sin x_1 + (g \cos x_1 - \\ x_4^2 x_3 \sin x_4 t \sin x_2 - F \sin x_5) \tan \varphi = \\ \frac{x_4^2 x_3 \sin x_4 t \cos(x_2 + \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{g \sin(\varphi - x_1)}{\cos \varphi} + \frac{F \cos(x_5 + \varphi)}{m \cos \varphi} \\ a_u = x_4^2 x_3 \sin x_4 t \cos x_2 - g \sin x_1 - (g \cos x_1 - \\ x_4^2 x_3 \sin x_4 t \sin x_2 - F \sin x_5) \tan \varphi = \\ \frac{x_4^2 x_3 \sin x_4 t \cos(x_2 - \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{g \sin(\varphi + x_1)}{\cos \varphi} + \frac{F \cos(x_5 - \varphi)}{m \cos \varphi} \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)等号两侧进行积分可以得到籽粒在筛面上滑移和下滑移的运动速度 v_d 和 v_u 为

$$\begin{cases} v_d = \int_{t_1}^t a_d dt = \left[-\frac{x_4 x_3 \cos(x_4 t) \cos(x_2 + \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{gt \sin(x_1 - \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{Ft \cos(x_5 + \varphi)}{m \cos \varphi} \right] \Big|_{t_1}^t = \\ \frac{x_4 x_3 (\cos x_4 t_1 - \cos x_4 t) \cos(x_2 + \varphi)}{\cos \varphi} - A_d (t - t_1) \\ v_u = \int_{t_3}^t a_u dt = \left[-\frac{x_4 x_3 \cos(x_4 t) \cos(x_2 - \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{gt \sin(x_1 + \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{Ft \cos(x_5 - \varphi)}{m \cos \varphi} \right] \Big|_{t_3}^t = \\ \frac{x_4 x_3 (\cos x_4 t_3 - \cos x_4 t) \cos(x_2 - \varphi)}{\cos \varphi} - A_u (t - t_3) \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{其中} \begin{cases} A_d = \frac{g \sin(x_1 - \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{F \cos(x_5 + \varphi)}{m \cos \varphi} \\ A_u = \frac{g \sin(x_1 + \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{F \cos(x_5 - \varphi)}{m \cos \varphi} \end{cases} \quad (13)$$

对籽粒运动速度 v_d 和 v_u 进行积分,得到籽粒在筛面上下滑移时移动距离 s_d 和上滑移时移动距离 s_u 为

$$\begin{cases} s_d = \int_{t_1}^{t_2} v_d dt = \left[\frac{x_3(x_4 \cos x_4 t_1 t - \sin x_4 t) \cos(x_2 + \varphi)}{\cos \varphi} + A_d \left(\frac{1}{2} t^2 - t_1 t \right) \right] \Big|_{t_1}^{t_2} = \\ \frac{x_4 x_3 \cos x_4 t_1 (t_2 - t_1) \cos(x_2 + \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{x_3 (\sin x_4 t_1 - \sin x_4 t_2) \cos(x_2 + \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{A_d}{2} (t_2 - t_1)^2 \\ s_u = \int_{t_3}^{t_4} v_u dt = \left[\frac{x_3(x_4 \cos x_4 t_1 t - \sin x_4 t) \cos(x_2 - \varphi)}{\cos \varphi} - A_u \left(\frac{1}{2} t^2 - t_3 t \right) \right] \Big|_{t_3}^{t_4} = \\ \frac{x_4 x_3 \cos x_4 t_3 (t_4 - t_3) \cos(x_2 - \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{x_3 (\sin x_4 t_3 - \sin x_4 t_4) \cos(x_2 - \varphi)}{\cos \varphi} - \frac{A_u}{2} (t_4 - t_3)^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中 t_1 ——籽粒下滑移起始时刻, s
 t_2 ——籽粒下滑移终止时刻, s
 t_3 ——籽粒上滑移起始时刻, s
 t_4 ——籽粒上滑移终止时刻, s
 $t_1 \sim t_4$ 可通过滑移相位求解,即

$$\begin{cases} \varphi_{d0} = \omega t_1 \\ \varphi_{d1} = \omega t_2 \\ \varphi_{u0} = \omega t_3 \\ \varphi_{u1} = \omega t_4 \end{cases} \quad (15)$$

式中 φ_{d0} ——下滑移初始相位, ($^\circ$)
 φ_{u0} ——上滑移初始相位, ($^\circ$)
 φ_{d1} ——下滑移终止相位, ($^\circ$)
 φ_{u1} ——上滑移终止相位, ($^\circ$)

对于滑移相位,可以通过玉米籽粒的加速度和速度变化来求解,籽粒的始滑相位与加速度有关,玉米籽粒的止滑相位速度相关,当玉米籽粒滑移运动开始时,加速度为 0 时是始滑相位的临界点;当玉米籽粒滑移运动终止时,速度为 0 时是止滑相位的临界点,加速度为 0 时,合力也为 0,此时籽粒为受力平衡状态,即

$$\begin{aligned} & mx_4^2 x_3 \sin x_4 t \cos x_2 - mg \sin x_1 + F \cos x_5 \pm \\ & (mg \cos x_1 - mx_4^2 x_3 \sin x_4 t \sin x_2 - F \sin x_5) \tan \varphi = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

籽粒的下滑移初始相位 φ_{d0} 和上滑移初始相位 φ_{u0} 可表示为

$$\begin{cases} \varphi_{d0} = \arcsin \frac{g \sin(x_1 - \varphi) - \frac{F}{m} \cos(x_5 + \varphi)}{x_4^2 x_3 \cos(x_2 + \varphi)} \\ \varphi_{u0} = \arcsin \frac{g \sin(x_1 + \varphi) - \frac{F}{m} \cos(x_5 - \varphi)}{x_4^2 x_3 \cos(x_2 - \varphi)} \end{cases} \quad (17)$$

当籽粒下滑移速度 v_d 和上滑移速度 v_u 均为 0 时,籽粒具有滑移终止相位,将边界条件代入

式(14)得到下滑移终止相位 φ_{d1} 和上滑移终止相位 φ_{u1} 可表示为

$$\begin{cases} \varphi_{d1} = \frac{\arcsin(\cos x_4 t_1 - \cos x_4 t)}{x_4 t - x_4 t_1} \\ \varphi_{u1} = \frac{\arcsin(\cos x_4 t_3 - \cos x_4 t)}{x_4 t - x_4 t_3} \end{cases} \quad (18)$$

根据式(17)、(18)可依次推导出 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 。籽粒的抛掷是由于振动筛振动时籽粒产生滑移而发生,抛掷运动发生在上滑移和下滑移之间,当玉米籽粒被振动筛抛起后,玉米籽粒与杂质会进一步分散开,有利于玉米籽粒透过振动筛,增大振动筛的筛分效率。根据式(1)~(4),当振动筛面对玉米籽粒的支撑力 T 为 0 时,玉米籽粒发生起抛,因此令支撑力 $T=0$ 可求解籽粒的一次抛掷起始时刻,2 个起始时刻时间差即为籽粒的抛掷时间 t ,即

$$\begin{cases} T = mg \cos x_1 - u \sin x_2 - F \sin x_5 = 0 \\ 2 \arcsin \frac{g \cos x_1 - \frac{F}{m} \sin x_5}{x_4^2 x_3 \sin x_2} \\ t = \frac{\quad}{x_4} \end{cases} \quad (19)$$

3 竖式可调节分风板设计与试验

3.1 结构设计

实际作业中,经过脱粒装置后的玉米籽粒会随机地落入到清选装置中,玉米籽粒与杂质在清选装置内部的分布呈前多后少、随机分布的趋势,因此使得风机吹出的气流在清选装置内部的左右分布与玉米籽粒和杂质的分布相适应,可以显著降低玉米籽粒的含杂率和损失率。

可调节分风板如图 4 所示,2 个分风板把风道分为左、中、右 3 部分,通过手柄带动调节杆运动,从而驱动分风板左右摆动,可以随着不同环境中玉米籽粒和杂质的分布不同而进行相适应地调节。

3.2 仿真分析

考虑到实际试验中改变不同结构和工作参数导

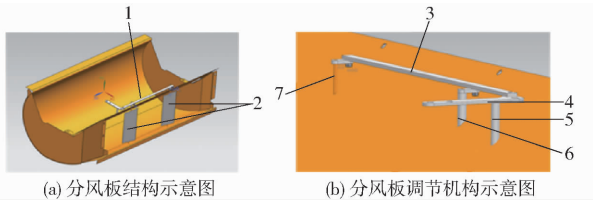


图4 竖式可调节分风板结构

Fig. 4 Structure diagrams of vertical adjustable air separated board

1. 调节机构 2. 分风板 3. 调节杆 4. 调节手柄 5. 支撑3
6. 支撑2 7. 支撑1

致工作效率低、可操作性差的问题,为探究竖式分风板倾斜角对清选装置内部流场产生的影响,利用 Fluent 软件对清选装置进行仿真。

3.2.1 分风板不倾斜时清选装置内部流场分析

为了验证可调节分风板的性能,首先在分风板不倾斜的条件下分别对清选装置内部流场的风速分布进行仿真和试验,将清选装置内部流场划分为上、中、下3层共60个区域,每层按照筛板尺寸划分为5列×4行共20个区域,风速测量点如图5所示。

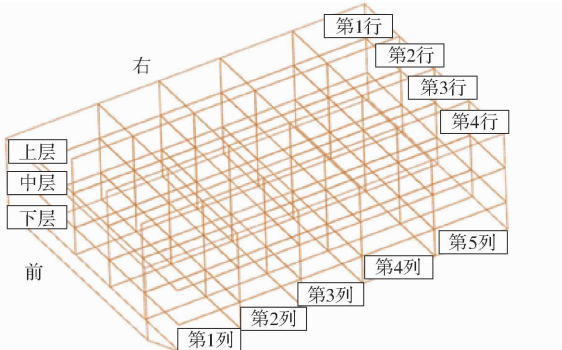


图5 风速测量点划分方法

Fig. 5 Dividing method of wind speed measurement points

首先在 UG (Unigraphics NX, Siemens PLM Software, 德国) 中建立清选装置内部流场三维模型,参照玉米联合收获机常用参数,结合前期预试验研究,上筛安装倾角为 5° 、下筛振动方向角为 45° 、振动筛振幅为 5 cm、风机倾角为 17° ;将三维模型导入 Fluent 软件中,通过 Mesh 功能进行网格划分,该

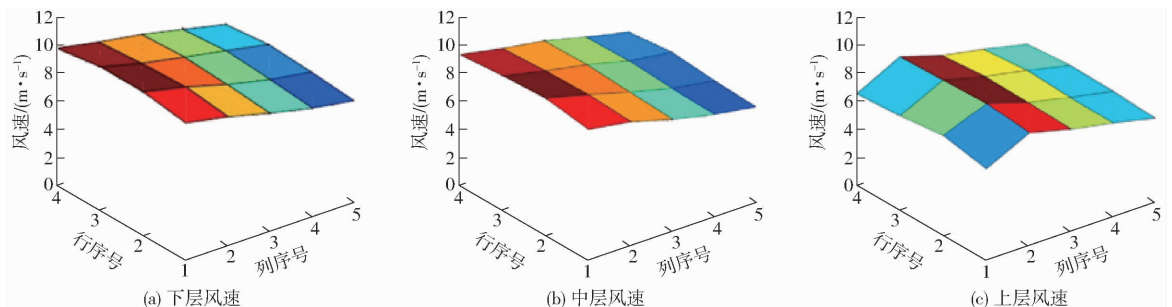


图7 分风板不倾斜时各测量点实际风速分布

Fig. 7 Distributions of wind speed at measurement points when air separated board without slanting

模型采用四面体非结构网格,共计 7 073 183 个,节点数为 1 366 514,空气密度为 1.225 kg/m^3 ,粘度为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,根据实际风机测得风速,设定进风口初速度 20 m/s ,选取标准 $k-\varepsilon$ 计算模型,其余参数均为默认,在后处理界面获取风速分布图,如图6所示。

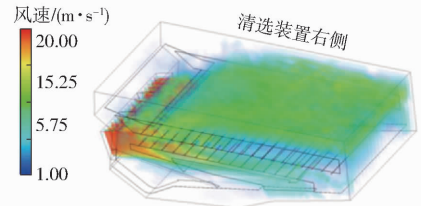


图6 分风板不倾斜时清选装置内部流场风速分布云图

Fig. 6 Wind speed distribution simulation cloud map of flow field inside cleaning device when air separated board without slanting

与仿真边界条件一致,通过风速测量仪对各个测量点风速进行采集,测量得到分风板不倾斜时清选装置内部各区域的风速,并通过区域划分绘制分布图,如图7所示。

如图6所示,在玉米籽粒直收装备实际作业时,为了实现籽粒与杂质完全分离,清选装置内的风速必须控制在籽粒漂浮速度与杂质漂浮速度之间。分风板不倾斜时,风机风道一分为三,清选装置内部的风速总体呈“前大后小”的规律,上筛面风速分布相对均匀,约 10.5 m/s ,上下筛之间风速最小,约 3 m/s ,小于籽粒最低漂浮速度,风机产生的风场不能很好通过筛孔吹向上筛表面,不利于清选作业。

如图7所示,当分风板不倾斜时,清选装置内风速大小差异较大,下层、中层风速呈“前大后小”的规律,上层中部风速较大,流场内风速最大值为 9.8 m/s ,最小值 4.0 m/s ,风机产生的风场不能完全实现籽粒风选,容易造成脱出混合物在筛面后方堆积的情况,影响后续清选作业。与仿真结果相比,实际测得的风速存在 $\pm 1 \text{ m/s}$ 的误差,这是由于工况下会受到环境、天气等因素的影响,加上风机自身的能量损耗,清选装置内部最大风速无法达到边

界条件,因此测得的结果产生的误差在合理范围内,说明仿真值与实测值得到的清选装置内部流场风速分布规律基本一致。

3.2.2 分风板不同倾斜角下清选装置内部流场分析

为了研究可调节分风板在不同倾斜角时清选装置内部流场分布规律,选取分风板左偏 30° 、左偏 18° 、左偏 7° 和右偏 18° 进行仿真,结果如图8所示。当分风板向左或右倾斜时,气流场内风力向左或右聚集,清选装置内部左右两侧的风速出现差异,适当调节角度可促进籽粒和杂质在不同风速下进行分离。不同倾斜角下的气流分布变化也较大,当分风板右偏 18° 时,清选装置左侧风速较大且分布较均

匀,风机产生的风场能够通过筛孔吹向上筛面,风速 $10\sim 12\text{ m/s}$ 之间,介于籽粒和杂质满足漂浮条件的风速范围之内;当分风板左偏 7° 时,清选装置内的气流主要集中在中部偏右的位置,最大值约 10.5 m/s ,且筛面后方风场区域大于前部,清选能力较差;当分风板左偏 30° 时,清选装置内的风场主要集中在清选装置的右前方,上筛面风速分布极不均匀,左右差值约 9.5 m/s ,不满足清选要求;当分风板左偏 18° 时,清选装置内风速分布情况与分风板右偏 18° 时基本对称,但上筛面中部出现区域断层,可能导致脱出混合物在此处无法得到有效分离,从仿真结果来看,分风板左偏或右偏 18° 时的风速分布较为理想。

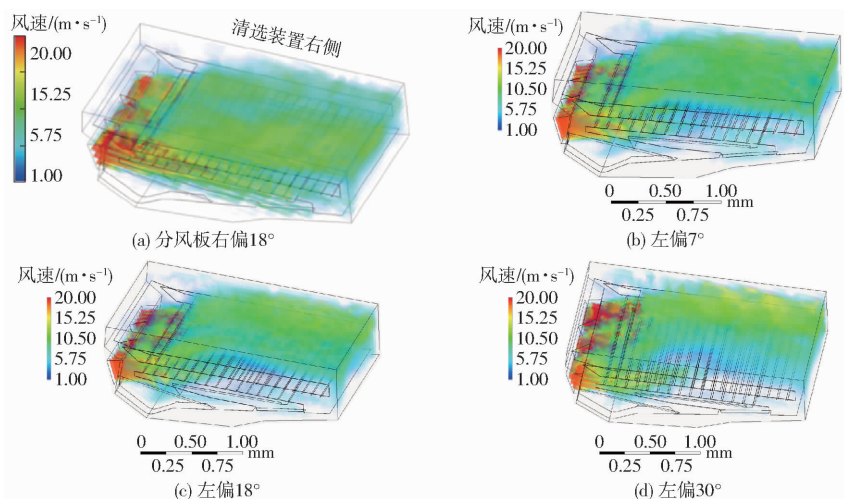


图8 清选装置内部流场风速分布仿真云图

Fig. 8 Wind speed distribution simulation cloud maps of flow field inside cleaning device

3.3 竖式可调节分风板验证试验与分析

为了进一步验证竖式可调节分风板作业性能,当风机出风口风速为 20 m/s 时,获取分风板右偏 18° 、左偏 7° 、左偏 18° 、左偏 30° 时各个测量点风速分布测量结果如图9所示。

由图9可知,随着分风板的左右倾斜,清选装置内部的气流场发生了明显变化,当分风板向左(或右)倾斜时,气流场内的气流也会随之向清选装置右侧(或左侧)聚集,当分风板右偏 18° 时,清选装置左侧风速分布均匀,上下筛风速差较小,约 1 m/s ,能够保持杂质稳定排出;分风板左偏 7° 时,清选装置下层左右和前后的风速差异较大,约 6 m/s ,与分风板左偏 18° 时的中层风速基本相同;分风板左偏 30° 时,上层第1、2列的第1、2行风速最大,超过 12 m/s ,不利于清选作业,与仿真结果相比,试验测得风速分布规律与其基本相符,但分风板右偏 18° 时的,气流分布效果相对较理想,各个测量点上的风速分布更均匀,因此最终确定竖式可调节分风板的倾斜角为右偏 18° 。

4 玉米清选装置试验与分析

为确定玉米清选装置最优工作参数组合,基于玉米脱粒清选试验平台,2020年1月在山东五征农业装备研究院试制车间进行台架试验,如图10所示。以振动筛转速、风机转速为试验因素,以籽粒损失率和含杂率为试验指标进行正交试验,根据研究前期预试验结果,振动筛转速在 $250\sim 300\text{ r/min}$ 时脱出混合物可顺利进行筛分,风机转速在 $800\sim 1000\text{ r/min}$ 时清选装置内的风速可满足物料最低漂浮速度。试验参照GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》^[22]进行,试验前将分风板倾斜角调至右偏 18° ,果穗喂入量 8.0 kg/s ,滚筒转速 315 r/min ,每组试验重复进行3次后取平均值,试验后从粮仓中随机取样,每次不少于 2000 g ,充分混合后抽取3份混合物,选出碎芯轴等杂余后进行称量,同时在试验平台后方选取 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 区域,收集区域内全部混合物,按照同样的方法对籽粒进行称量,单次试验籽粒损失率 Y_1 和含杂率 Y_2 计算式为

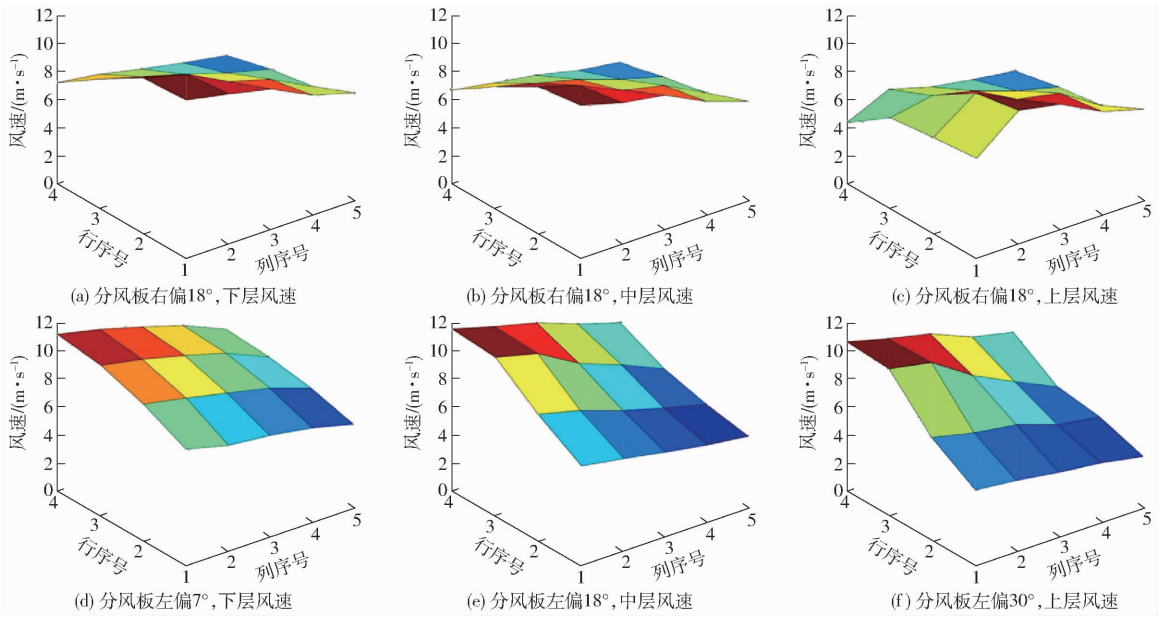


图9 各测量点风速分布

Fig.9 Distributions of wind speed at measurement points

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{w_{g1}}{w_{g1} + w_{w1}} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{w_{g2}}{w_{g2} + w_{w2}} \times 100\% \end{cases} \quad (20)$$

式中 w_{g1} ——试验平台后方样品中籽粒质量, g
 w_{w1} ——试验平台后方样品混合物中杂余质量, g
 w_{g2} ——集粮箱样品中籽粒质量, g
 w_{w2} ——集粮箱样品中杂余质量, g



图10 台架试验现场

Fig.10 Test platform experiment

试验因素水平如表2所示,试验结果如表3所示,方差分析结果如表4所示。由表3可知,随着振动筛转速和风机转速的增大,籽粒损失率逐渐增大,含杂率逐渐降低,这是由于振动筛转速较小时,脱出混合物在筛面上运动速度和移动距离较小,籽粒无法得到有效分离,筛选后含杂多,当风机转速较小时,清选装置内风速偏小,由于筛选不充分导致籽粒和少量碎芯轴一同进入集粮箱,含杂率偏高,损失率较小,当风机转速较大时,清选装置内风速较大,导致籽粒随杂余一同被吹出机体外,损失率偏高;振动筛转速较高时,振动筛上脱出混合物运动速度过快,

移动距离较小,出现“回跳”现象,同样导致籽粒不能从混合物中被分离。

表2 试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of test

水平	因素	
	振动筛转速/(r·min ⁻¹)	风机转速/(r·min ⁻¹)
1	250	800
2	275	900
3	300	1000

表3 正交试验安排与结果

Tab.3 Arrangement and results of orthogonal test

序号	振动筛转速	风机转速	损失率/%	含杂率/%
1	1	1	0.83	8.17
2	1	2	1.45	6.33
3	1	3	3.67	5.08
4	2	1	1.12	3.51
5	2	2	1.34	1.66
6	2	3	3.38	1.07
7	3	1	3.23	2.56
8	3	2	4.51	1.70
9	3	3	5.54	0.73

由表4可知,振动筛转速对籽粒含杂率具有极显著影响,对籽粒损失率有显著影响,风机转速对试验指标具有显著影响,振动筛转速的影响比风机转速明显,籽粒损失率最小0.83%,最大5.54%,含杂率最小0.73%,最大8.17%,根据NY/T 1355—2007《玉米收获机作业质量》^[23],参考专家建议和企业要求,籽粒损失率 Y_1 应小于等于2.0%,含杂率 Y_2 小于等于2.0%,当振动筛转速为250 r/min时,该因素水平下含杂率均不满足要求,当振动筛转速

为 300 r/min 时,该因素水平下损失率均不能满足要求,结合试验结果和方差分析,综合考虑损失率和含杂率较小时清选效果较好,玉米清选装置最优工作参数组合为:振动筛转速 275 r/min、风机转速 900 r/min,损失率和含杂率分别为 1.34% 和 1.66%,满足标准要求。

表 4 方差分析

Tab. 4 Analysis of ANOVA

试验指标	方差来源	平方和	自由度 f	F	P
损失率	振动筛转速	12.122	2	45.384	**
	风机转速	9.710	2	36.354	**
	误差	0.534	4		
	校正总计	22.365	8		
含杂率	振动筛转速	43.598	2	157.547	***
	风机转速	9.169	2	33.232	**
	误差	0.906	4		
	校正总计	53.348	8		

注:***表示极显著,**表示显著。

5 结论

(1)为优化玉米籽粒直收装备清选装置的性

能,降低玉米籽粒损失率和含杂率,本文通过理论分析、仿真模拟和试验验证影响清选效果的主要参数,对气流场的分布影响因素进行了分析研究;建立了籽粒在振动筛不同工作条件下的运动模型,推导振动筛倾角、振动方向角、振幅、振动频率和风机风力倾角与玉米籽粒在振动筛上的平均运动速度的关系。

(2)设计了一种可调节分风板,可适应玉米籽粒与杂质的随机分布,利用 Fluent 对清选装置内部流场进行仿真分析,结果表明,分风板右偏 18°时,风速分布均匀,内部流场垂直方向上风速的阶梯变化受进风口风速变化小,清选装置内部的气流场分布效果较好,有利于脱出混合物的清选。

(3)通过台架试验验证可调节分风板的清选效果,结果表明振动筛转速对籽粒含杂率具有极显著影响,对籽粒损失率有显著影响,风机转速对试验指标具有显著影响,当振动筛转速为 275 r/min、风机转速为 900 r/min、分风板右偏 18°时,籽粒损失率为 1.34%、含杂率为 1.66%,满足标准要求。

参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京:中国统计出版社,2019.
- [2] 建农. 2020 年三大粮食作物耕种收机械率将达 80% [J]. 农业装备技术,2015(5):1.
- [3] 耿爱军,杨建宁,张兆磊,等. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究,2016,38(4):251-256.
- [4] 白钰,杨自栋,耿端阳. 浅述我国玉米联合收获机技术进展及发展趋势[J]. 农业装备与车辆工程,2010(7):3-6,32. BAI Yu, YANG Zidong, GENG Duanyang. Improvement and development trend of corn harvester technology[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2010(7): 3-6, 32. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 耿端阳,张道林. 新编农业机械学[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [7] 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)
- [8] LIANG Zhenwei, XU Lizhang, BAERDEMAEKER J D, et al. Optimization of a multi-duct cleaning device for rice combine harvesters utilising CFD and experiments[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 25-40.
- [9] 程超,付君,郝付平,等. 清选筛运动参数对玉米芯轴堵筛规律的影响[J]. 吉林大学学报(工学版),2020,50(1):351-360. CHENG Chao, FU Jun, HAO Fuping, et al. Influence of motion parameters of cleaning sieve on the law of corncob shaft plugging sieve[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(1): 351-360. (in Chinese)
- [10] 王立军,张传根,丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):108-114. WANG Lijun, ZHANG Chuangen, DING Zhenjun. Structure optimization of cleaning screen for maize harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 108-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160916&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.016. (in Chinese)
- [11] 王立军,冯鑫,郑招辉,等. 玉米清选组合孔筛体设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):104-113. WANG Lijun, FENG Xin, ZHENG Zhaohui, et al. Design and test of combined sieve of maize screening [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 104-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190512&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.012. (in Chinese)

- [12] 王立军,武振超,冯鑫,等. 玉米收获机清选曲面筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):97-108.
WANG Lijun, WU Zhenchao, FENG Xin, et al. Design and experiment of curved screen for maize grain harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 97-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.010. (in Chinese)
- [13] 王立军,彭博,宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):90-96.
WANG Lijun, PENG Bo, SONG Huiqiang. Cleaning of maize mixture based on polyurethane rubber sieve [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 90-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180711&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.011. (in Chinese)
- [14] 樊晨龙,崔涛,张东兴,等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):239-248.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 239-248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s032&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.032. (in Chinese)
- [15] 唐忠,李耀明,李洪昌,等. 联合收获机风筛式清选装置清选室内涡流试验[J]. 农业机械学报,2010,41(12):62-66.
TANG Zhong, LI Yaoming, LI Hongchang, et al. Analysis on the eddy current of the air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 62-66. (in Chinese)
- [16] XU Lizhang, LI Yang, CHAI Xiaoyu, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 11-24.
- [17] BADRETDINOV I, MUDARISOV S, LUKMANOV R, et al. Mathematical modeling and research of the work of the grain combine harvester cleaning system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165: 104966.
- [18] 李洋. 玉米风筛清选机构内气固两相运动规律研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
LI Yang. Numerical simulation and experimental study on maize air-and-screen cleaning device [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [19] 梁振伟. 多风道清选装置设计方法及清选损失监测与控制技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2018.
LIANG Zhenwei. Study on designing method of multi-duct air-and-screen cleaning unit and grain sieve loss monitoring and controlling technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese)
- [20] 张传根. 玉米籽粒收获机清选筛体结构的优化研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
ZHANG Chuangen. Structural optimization of the cleaning screen for maize grain harvester[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [21] 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 velocity testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 43-49. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国质量监督检验检疫局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 21961—2008 玉米收获机械 试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [23] 中华人民共和国农业部. NY/T 1355—2007 玉米收获机 作业质量[S]. 北京:中国标准出版社,2007.