

振动筛不同运动形式对颗粒群筛分的影响

王立军¹ 崔友强¹ 郑招辉¹ 冯鑫¹ 沈宝山² 李义博¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江农垦八五二农场, 双鸭山 155600)

摘要: 为研究不同运动形式振动筛的筛分性能, 对平面往复、三移动一摆动、三移动两转动振动筛筛面上颗粒的分散程度进行分析和试验。基于颗粒非线性跳动理论, 利用 Matlab 软件模拟得出颗粒在不同运动形式筛面上的运动状态; 以分散度为试验指标, 利用高速摄像机对玉米颗粒在 3 种振动平板上的运动进行跟踪。颗粒在振动平板上的运动规律证明了颗粒非线性跳动理论分析结果的正确性, 随着振动筛主轴转速逐渐增大, 颗粒群在 3 种振动平板上的分散度均呈现先增大、后减小的变化规律。在振动筛主轴最优转速下, 玉米颗粒群在三移动一摆动、三移动两转动振动筛筛面上的综合分散度分别为 38.96 mm 和 40.73 mm, 较平面往复振动筛分别提高了 14.39% 和 19.58%。以筛分效率为试验指标, 利用 3 种振动筛筛面进行物料筛分试验, 物料筛分试验结果表明, 颗粒群在 3 种振动筛上的筛分效率由高到低依次为: 三移动两转动振动筛、三移动一摆动振动筛、平面往复振动筛。物料筛分试验结果证明了用振动平板对颗粒群分散度进行研究的可行性, 同时验证了平板试验结果的正确性。

关键词: 振动筛; 颗粒跳动; 分散度; 高速摄像

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)06-0119-11

Effect of Different Motion Forms of Vibrating Screen on Screening of Particle Group

WANG Lijun¹ CUI Youqiang¹ ZHENG Zhaohui¹ FENG Xin¹ SHEN Baoshan² LI Yibo¹

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

2. The 852 Farm of Heilongjiang Agricultural Reclamation, Shuangyashan 155600, China)

Abstract: Aiming to determine the screening performance of the vibration screen with different motion forms, the dispersion of particles on the plane reciprocating vibration screen, the vibration screen with three translations and one swing, and the vibration screen with three translations and two rotations were studied. Based on the nonlinear law of particle moving, the movements of particles on different screens with different motions were simulated by Matlab. The dispersity was taken as the experimental index. The motions of maize particles on three kinds of vibrating plate were tracked by high speed camera. The motion law of the particles on the vibration plate verified the correctness of the results of nonlinear law of particle moving based on theoretical analysis. The dispersity of the particles on the three kinds of vibration plates was increased firstly and then decreased with the increase of the spindle speed of the vibrating screen. At optimum rotating speed of the main shaft of the vibrating screen, the comprehensive dispersion of the maize particle group on the vibration plate with three translations and one swing and the vibration plate with three translations and two rotations were respectively 38.96 mm and 40.73 mm, which were 14.39% and 19.58% higher than that of the plane reciprocating vibration plate. The screening efficiency was taken as test index, and vibrating screens with three kinds of motions were tested for screening material. The results of material screening test showed that the screening efficiency of particle group on three kinds of vibrating screens from high to low was: the vibration screen with three translations and two rotations, the vibration screen with three translations and one swing and plane reciprocating vibrating screen. The results of material screening test verified the feasibility of studying the dispersion of particle group by using the vibrating plate and the correctness of the results. The research results provided references for the analysis of screening performance of the vibration screen with different motion forms and the design and application of the new vibration screen.

Key words: vibrating screen; particle moving; dispersion; high speed camera

收稿日期: 2018-10-15 修回日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475090)、黑龙江省自然科学基金项目(E2017004)和国家重点研发计划项目(2018YFD0300103)

作者简介: 王立军(1978—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事收获机械研究, E-mail: wljszf@163.com

0 引言

清选装置是收获机的重要组成部分,直接影响到整机的工作性能。物料在筛面上的运动形式对清选装置的筛分效率具有重要影响^[1-6]。振动筛在作业时,颗粒群在筛面上的分散程度直接影响物料的分层与透筛,进而影响振动筛的筛分效率^[7]。因此,研究筛分过程中物料的分散程度具有重要意义。

王成军等^[8]基于离散元法对棉籽颗粒群,在三自由度振动筛筛面上的筛分过程进行了模拟分析,得出筛面的三自由度振动利于颗粒物料在筛面上的分散。马履中等^[9]利用 LS-DYNA 程序,对往复式和两种新型多维运动振动筛筛面上的颗粒运动进行了模拟研究,并对 3 种筛面上颗粒的分散情况进行了对比。赵跃民等^[10]通过对矩形振动盒内颗粒群的运动状态进行离散元模拟,得出计算参数对离散元法模拟结果的影响。刘琼^[11]构造了三自由度混联激振机构,基于 EDEM 对棉花颗粒群在三自由度振动筛筛面上的筛分过程进行模拟分析。刘初升等^[12-13]利用单颗粒在筛面上运动的非线性动力学模型,对颗粒周期运动进行稳定性分析,并对颗粒非线性运动规律进行讨论。WANG 等^[7]基于颗粒的非线性跳动理论,以平面往复振动筛为试验平台,模拟出玉米颗粒沿筛面长度方向不同位置处的运动规律。沈惠平等^[14-15]利用并联振动筛和直线筛试验样机进行对比试验,提出用透筛率和筛分效率衡量筛分效果,然后从同量物料的完全筛分及在不同时间段内筛分两方面进行试验比较。李菊等^[16-17]在不考虑气流作用的情况下,分别基于平面筛面和凸柱筛面的直线振动筛和并联振动筛进行筛分试验,得出凸柱筛面的并联振动筛有利于提高谷物的筛分效率和透筛率。PAUL 等^[18]运用 EDM 离散法研究了大型双层香蕉筛,探索该装置内颗粒流动特性,并获得了筛分性能与物料流动性的关系。

目前,研究者对于不同振动筛筛面上颗粒群分散度的研究主要以仿真研究为主,而对颗粒群在不同筛面上的分散性进行试验的研究鲜有报道,且忽略了气流的作用。谷物清选装置中振动筛的运动形式和气流的作用均会对颗粒群的分散度产生影响,在初始气流相同的情况下,由于振动筛的运动情况不同,每种振动筛筛上空间气流分布不同,气流对颗粒的作用效果不同,通过台架试验调节风机流量也很难实现不同振动筛筛上气流场分布相同。基于上述原因,本文研究振动筛的运动形式对颗粒群分散度的影响,在 3 种振动筛筛面颗粒非线性跳动理论分析的基础上,以 3 种运动形式的振动筛为研究平

台,利用高速摄像对颗粒群分散性进行跟踪,观察颗粒群在振动平板上的实际分散情况,并进行筛面物料筛分验证试验,从而对比分析不同运动形式振动筛的筛分性能,为不同振动筛的选用及新型振动筛的设计与应用提供参考依据。

1 振动筛机构与工作原理

目前,平面往复振动筛的理论相对比较成熟,故玉米清选装置中的振动筛主要采用平面往复振动筛,但其运动形式简单,不易于颗粒群在筛面上的分散。很多专家提出了多维运动振动筛,可使颗粒群在筛面上实现快速分散,本文对以下 3 种振动筛进行研究。

1.1 平面往复振动筛

平面往复振动筛主要由上筛、连杆、曲柄、下筛、上吊杆、下支撑杆等组成,如图 1 所示。在电机驱动下,曲柄做匀速圆周运动,带动连杆做周期性运动;通过连杆与上吊杆和下支撑杆的作用,带动上筛和下筛做周期性运动,使颗粒在筛面以一定速度上滑、下移、抛起或透筛,上滑的距离大于下移的距离,保证了颗粒由筛面前端运动到筛面尾部,从而实现振动筛的平面往复振动^[7]。

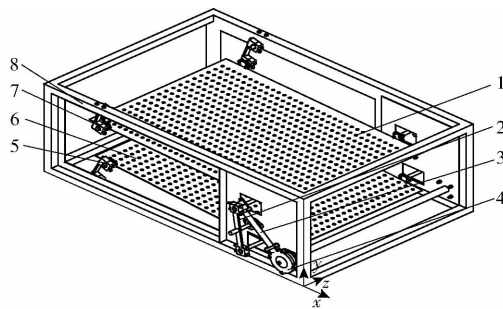


图 1 平面往复振动筛模型

Fig. 1 Model of plane reciprocating vibrating screen

1. 上筛 2. 连杆 A 3. 连杆 B 4. 曲柄 5. 下支撑杆 6. 下筛
7. 上吊杆 8. 机架

1.2 三移动一摆动振动筛

三移动一摆动振动筛主要由机架、侧板、滑道、连杆、偏心轮、下支撑杆、筛面、上吊杆等组成,如图 2 所示。在电机驱动下,偏心轮转动带动连杆摆动使滑块在滑道内往复运动,滑道内槽底部与筛面侧板不平行,故滑块在滑道内上下滑动时,使筛面实现沿 x 、 y 、 z 方向的移动。筛面后端通过上吊杆铰接固定在筛架上,筛面前端与滑块铰接,筛面随着滑块在滑道内上下滑移,由于筛面前后的铰接固定端分布于筛面的上下两侧,因而能够实现筛面围绕 z 轴摆动,从而实现 3 个方向的移动和 1 个方向的摆动。

1.3 三移动两转动振动筛

三移动两转动振动筛主要由上筛、机架、导杆、

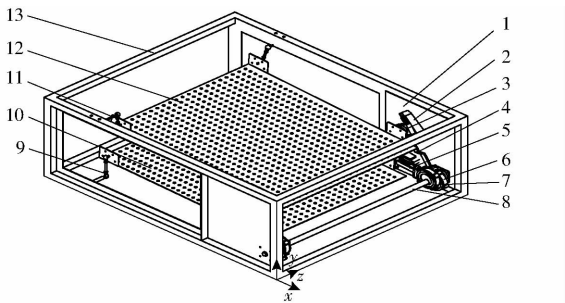


图2 三移动一摆动振动筛模型

Fig.2 Model of vibrating screen with three translations and one swing

- 1.侧板 2.滑道 3.滑块 4.连杆A 5.连杆B 6.偏心轮A
7.偏心轮B 8.主轴 9.下支撑杆 10.下筛 11.上吊杆 12.上筛 13.机架

限位杆、V型杆、T型杆、偏心轮、连杆、摇杆、吊杆、球铰等组成,如图3所示。在电机驱动下,偏心轮转动带动连杆使摇杆摆动,使筛面实现沿 x 、 y 方向的移动。筛面前后的铰接固定端分布于筛面的上下两侧,在筛面沿 x 、 y 方向移动时,会产生一个附加的转动,因而能够实现筛面围绕 z 轴转动;机构左右两侧限位杆铰接位置的不对称布置,使筛面两侧导杆在摇杆的牵引作用下不同步运动,进而实现筛面绕 x 轴转动;限制左侧活动连杆绕 x 轴转动,而右侧不加限制,进而实现筛面沿 z 向移动,从而实现3个移动2个转动的运动形式^[19]。

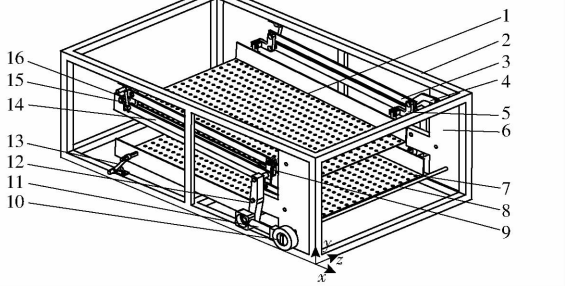


图3 三移动两转动振动筛模型

Fig.3 Model of vibrating screen with three translations and two rotations

- 1.上筛 2.机架 3.导杆A 4.限位杆 5.V型杆 6.侧板
7.下筛 8.主轴 9.T型杆 10.偏心轮 11.连杆 12.摇杆
13.支撑杆 14.导杆B 15.吊杆 16.球铰

2 颗粒非线性跳动理论分析

以平面往复、三移动一摆动、三移动两转动振动筛与试验台架为研究对象,根据振动筛的物理样机,推导筛面运动方程,把筛面等距划分成若干条直线,如图4所示。建立玉米颗粒与筛面上每条直线的碰撞示意图,如图5所示。

图5中以筛面上任意一点 λ 为坐标原点建立直角坐标系,空心圆表示颗粒在 xOy 面的投影, u 、 v 分

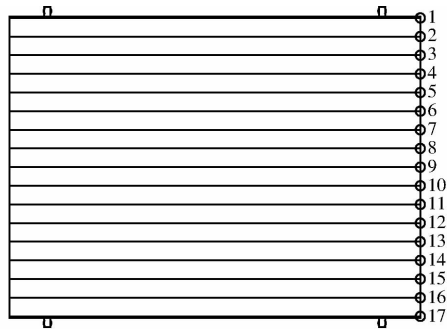


图4 筛面直线分布

Fig.4 Lines distribution on screen

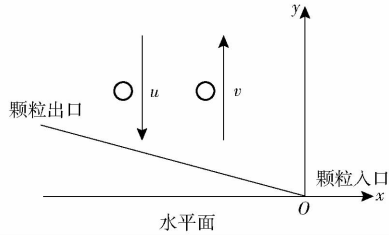


图5 颗粒与筛面碰撞示意图

Fig.5 Collision diagram between grain and screen

别表示颗粒趋向和离开筛面时 y 向的速度, O 点 y 向的速度为 v_{yo} ,若 t_j 时刻粒子与筛面发生第 j 次碰撞,根据弹性碰撞规律有^[9,13]

$$v(t_j) - v_{yo}(t_j) = -\delta(u(t_j) - v_{yo}(t_j)) \quad (1)$$

式中 δ ——速度恢复系数,一般取0.5^[13]

颗粒第 j 次离开筛面的速度近似等于第 $j+1$ 次趋向筛面速度,即

$$u(t_{j+1}) = -v(t_j) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)整理可得

$$v(t_{j+1}) = \delta v(t_j) + (1 + \delta)v_{yo}(t_{j+1}) \quad (3)$$

由于颗粒与筛面碰撞时间极短,相对于颗粒上抛与下落的时间可忽略,则

$$t_{j+1} - t_j = \frac{2v(t_j)}{g} \quad (4)$$

将式(3)两边乘以 $2\omega_1/g$,式(4)两边乘以 ω_1 。 ω_1 为振动筛结构中曲柄的角速度。

在3种振动筛中分别有^[7,19]

$$v_{yo1} = l_{81}\omega_{51}\cos\theta_{51} + l_{31}\omega_{31}\cos\theta_{31} \quad (5)$$

$$v_{yo2} = \omega_{12}l_{12}\cos\theta_{12} + \omega_{22}l_{22}\sin\theta_{22} + \omega_{32}l_{M2}\cos\theta_{32} \quad (6)$$

$$v_{yo3} = \omega_{33}l_{33}\cos\theta_{33} + \omega_{53}l'_{53}\sin(\theta_{53} + \theta'_{113}) + \omega_{\beta3}l_{N3}\cos\theta_{\beta3} + \omega_{73}l_{M3}\cos\theta_{73} \quad (7)$$

$$l'_{53} = \sqrt{l_{83}^2 + l_{53}^2} \quad (8)$$

$$\theta'_{113} = \arctan(l_{83}/l_{53}) \quad (9)$$

其中

$$\omega_{51} = f_{11}(\omega_1 t) \quad \theta_{51} = f_{31}(\omega_1 t)$$

$$\omega_{31} = f_{21}(\omega_1 t) \quad \theta_{31} = f_{41}(\omega_1 t)$$

$$\omega_{12} = f_{12}(\omega_1 t) \quad \theta_{12} = f_{22}(\omega_1 t) \quad \omega_{22} = f_{32}(\omega_1 t)$$

$$\theta_{22} = f_{42}(\omega_1 t) \quad \omega_{32} = f_{52}(\omega_1 t) \quad \theta_{32} = f_{62}(\omega_1 t)$$

$$\begin{aligned}\omega_{33} &= f_{13}(\omega_1 t) & \theta_{33} &= f_{23}(\omega_1 t) & \omega_{53} &= f_{33}(\omega_1 t) \\ \theta_{53} &= f_{43}(\omega_1 t) & \omega_{63} &= f_{53}(\omega_1 t) & \theta_{63} &= f_{63}(\omega_1 t) \\ \omega_{73} &= f_{73}(\omega_1 t) & \theta_{73} &= f_{83}(\omega_1 t)\end{aligned}$$

式中 v_{y01} 、 v_{y02} 、 v_{y03} ——平面往复、三移动一摆动、三移动两转动振动筛筛上 O 点 y 向的速度, m/s

l_{i1} 、 l_{i2} 、 l_{i3} ——平面往复、三移动一摆动、三移动两转动振动筛中第 i 个杆件的长度, mm

θ_{i1} 、 θ_{i2} 、 θ_{i3} ——平面往复、三移动一摆动、三移动两转动振动筛中第 i 个杆件与 x 轴的方位夹角, rad

ω_{i1} 、 ω_{i2} 、 ω_{i3} ——平面往复、三移动一摆动、三移动两转动振动筛中第 i 个杆件的角速度, rad/s

$\theta_{\beta3}$ ——筛面在 yOz 平面内的倾角, rad

$\omega_{\beta3}$ ——筛面在 yOz 平面内的角速度, rad/s

l_{N3} ——筛面上任意一点 N 与筛面左侧的距离, mm

l_{M2} 、 l_{M3} ——三移动一摆动、三移动两转动振动筛筛面上任意一点 M 与筛面前端的距离, mm

并假设 $p = \omega_1 t = \theta_1$, $q = \frac{2\omega_1 v(t_j)}{g}$, 则 p_j 、 q_j 分别表示籽粒与筛面第 j 次碰撞时 p 、 g 的值, 可推导得二维映射

$$\begin{cases} p_{j+1} = p_j + q_j \\ q_{j+1} = \delta q_j + Af(p_j + q_j) \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$A = \frac{2\omega_1(\delta + 1)}{g} \quad (11)$$

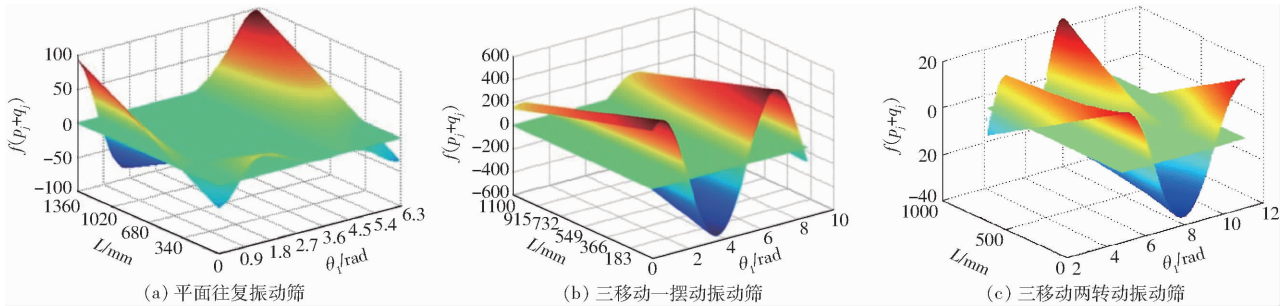


图 6 不同驱动机构 $f(p_j + q_j)$ 的零点分布

Fig. 6 Zero distribution of $f(p_j + q_j)$ of different driving mechanisms

式(10)的雅可比矩阵为

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial p_{j+1}}{\partial p_j} & \frac{\partial p_{j+1}}{\partial q_j} \\ \frac{\partial q_{j+1}}{\partial p_j} & \frac{\partial q_{j+1}}{\partial q_j} \end{vmatrix}_{(p_0, q_0)} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ Af'_{p_j}(p_0) & \delta + Af'_{q_j}(p_0) \end{vmatrix} \quad (15)$$

在 3 种振动筛中有^[7,19]

$$\begin{aligned}f_1(p_j + q_j) &= l_{81}f_{11}(p_j + q_j)\cos(f_{31}(p_j + q_j)) + \\ &\quad l_{31}f_{21}(p_j + q_j)\cos(f_{41}(p_j + q_j)) \\ &\quad f_2(p_j + q_j) = \\ &\quad l_{12}f_{12}(p_j + q_j)\cos(f_{22}(p_j + q_j)) + l_{22}f_{32}(p_j + q_j) \cdot \\ &\quad \cos(f_{42}(p_j + q_j)) + l_{M2}f_{52}(p_j + q_j)\cos(f_{62}(p_j + q_j))\end{aligned} \quad (12)$$
$$\quad (13)$$

$$\begin{aligned}f_3(p_j + q_j) &= l_3f_{13}(p_j + q_j)\cos(f_{23}(p_j + q_j)) + \\ &\quad l'_{53}f_{33}(p_j + q_j)\sin(f_{43}(p_j + q_j)) + \\ &\quad l_{N3}f_{53}(p_j + q_j)\cos(f_{63}(p_j + q_j)) + \\ &\quad l_{M3}f_{73}(p_j + q_j)\cos(f_{83}(p_j + q_j))\end{aligned} \quad (14)$$

式中 $f_1(p_j + p_q)$ ——平面往复振动筛二维映射中的函数

$f_2(p_j + p_q)$ ——三移动一摆动振动筛二维映射中的函数

$f_3(p_j + p_q)$ ——三移动两转动振动筛二维映射中的函数

$f_{i1}(p_j + p_q)$ ——平面往复振动筛二维映射中的变量

$f_{i2}(p_j + p_q)$ ——三移动一摆动振动筛二维映射中的变量

$f_{i3}(p_j + p_q)$ ——三移动两转动振动筛二维映射中的变量

式(10)若存在一系列不动点 K , 那么 $q_j = 0$, 由于 $A \neq 0$, 所以 $f(p_j + q_j) = 0$ 。对 $f(p_j + q_j) = 0$ 进行数值计算, 获得解沿筛面长度 L 的分布情况如图 6 所示。表明在一个周期内 $f(p_j + q_j) = 0$ 方程均有解, 可知式(10)存在一系列不动点 K 。

其特征值方程

$$|\lambda E - J| = \begin{vmatrix} \lambda - 1 & -1 \\ -Af'_{p_j}(p_0) & \lambda - (\delta + Af'_{q_j}(p_0)) \end{vmatrix} \quad (16)$$

其特征值为

$$\lambda_1 = \frac{1 + \delta + Af_{qj}''(p_0) + \sqrt{(1 + \delta + Af_{qj}''(p_0))^2 - 4(\delta + Af_{qj}''(p_0) - Af_{pj}''(p_0))}}{2} \quad (17)$$

$$\lambda_2 = \frac{1 + \delta + Af_{qj}''(p_0) - \sqrt{(1 + \delta + Af_{qj}''(p_0))^2 - 4(\delta + Af_{qj}''(p_0) - Af_{pj}''(p_0))}}{2} \quad (18)$$

特征值 λ 通过 Matlab 数值模拟得出,对于平面往复、三平移一摆动、三平移两转动 3 种筛分模式,利用公式(17)、(18)计算 λ 时所用的初始值均为:
 $\delta = 0.5, A = 2\omega_1(\delta + 1)/g, \omega_1 = 2\pi n, n = 240 \text{ r/min}$ 。

颗粒在筛面上跳动的周期稳定性与不动点 K 的稳定性等价,不动点 K 的稳定性由二维映射的雅

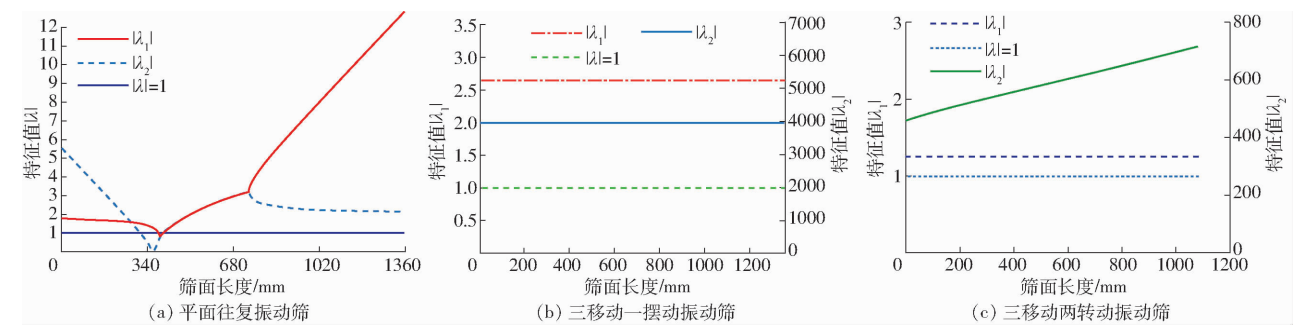


图 7 特征值变化曲线

Fig. 7 Changing curves of characteristic value

由图 7a 可知,颗粒在平面往复振动筛不同的筛长范围内会产生不同的运动形式。在筛面长度 $0 \sim 322 \text{ mm}$ 内, $|\lambda_1| > 1, |\lambda_2| > 1$, 不动点为不稳定结点,颗粒发生混沌运动;在筛面长度 $322 \sim 397 \text{ mm}$ 内, $|\lambda_1| > 1, 0 < |\lambda_2| < 1$, 不动点为鞍点,受到轻微干扰后,不动点失稳,颗粒将发生倍周期分岔运动;在筛面长度 $397 \sim 461 \text{ mm}$ 内, $|\lambda_1|, |\lambda_2|$ 均小于 1, 不动点为稳定结点,颗粒发生稳定的周期运动;在筛面长度 $461 \sim 780 \text{ mm}$ 内, $|\lambda_1|, |\lambda_2|$ 均大于 1 且为共轭复数,不动点为不稳定焦点,不动点失稳,颗粒将发生 Hopf 分岔运动;在筛面长度 $780 \sim 1360 \text{ mm}$, $|\lambda_1| > 1, |\lambda_2| > 1$, 不动点为不稳定结点,不动点失稳,颗粒发生混沌运动^[7,21]。

由图 7b、7c 可知,沿筛面长度方向,三移动一摆动振动筛和三移动两转动振动筛的特征值始终满足 $|\lambda_1| > 1, |\lambda_2| > 1$, 两直线未出现交叉点,并且两个特征值的绝对值相差很大,由此可推断在三移动一摆动振动筛和三移动两转动振动筛的筛面上,不动点为不稳定结点,不动点失稳,颗粒均发生混沌运动。

3 平板上颗粒群分散性试验

3.1 试验材料与装置

选取德美亚一号玉米作为研究颗粒群分散性的试验材料。玉米颗粒形状包括球形、锥形、矩形,各

可比矩阵的特征值 λ_1, λ_2 共同决定,由混沌运动理论可知^[20]:若 $0 < \lambda_1 < 1, 0 < \lambda_2 < 1$, 不动点 K 为稳定结点;若 $\lambda_1 > 1, \lambda_2 > 1$, 不动点 K 为不稳定结点;若 $0 < \lambda_1 < 1, \lambda_2 > 1$ (或 $0 < \lambda_2 < 1, \lambda_1 > 1$), 不动点 K 为鞍点;若 λ_1 与 λ_2 为共轭复数且 $|\lambda_1| = |\lambda_2| < 1$, 不动点 K 为稳定焦点;若 λ_1 与 λ_2 为共轭复数,且 $|\lambda_1| = |\lambda_2| > 1$, 不动点 K 为不稳定焦点;若特征值 $|\lambda_1| < 1, |\lambda_2| < 1$, 则不动点 K 稳定,颗粒具有稳定的周期运动;否则颗粒将发生分岔,可能走向混沌。

基于 Matlab 数值计算及可视化功能对 3 种振动筛的不动点映射特征值进行数值模拟。在筛面长度范围内,特征值的数值模拟结果如图 7 所示。

自所占的百分比分别为 15.8%、74.1%、10.1%^[22],如图 8 所示。每次试验选用同一组颗粒。



图 8 试验材料

Fig. 8 Experimental material

1. 锥形玉米 2. 矩形玉米 3. 球形玉米

为了对比玉米颗粒群在不同振动筛筛面上的分散程度,试验装置主要由平面往复振动筛、三移动一摆动振动筛、三移动两转动振动筛、高速摄像机 (Phantom V5.1)、新闻灯、变频器 (MM430 6ES6430-2UD27-56CA0) 和电动机 (Y2-132M2-6) 等组成,如图 9 所示。

3.2 试验内容与方法

高速摄像机可获取筛面运动信息,为了定量分析颗粒群在筛面上运动特性,需要利用标尺标定比例尺寸。试验时在筛面上粘贴白色 0.04 m 长纸条作为标尺^[7]。

为了分析颗粒的运动规律,获得玉米颗粒群在

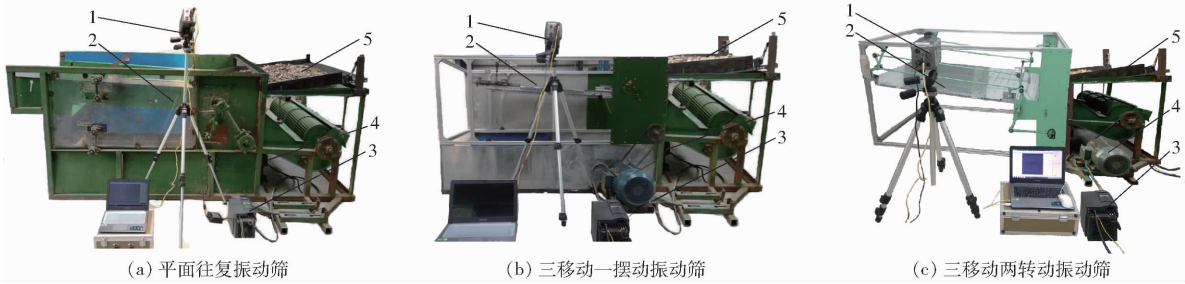


图 9 试验装置

Fig.9 Experimental devices

1. 高速摄像机 2. 振动筛 3. 变频器 4. 电动机 5. 抖动板

3 种振动筛筛面上的分散情况,进行颗粒群分散性平板试验。试验前在 Phantom 软件中将高速摄像机拍摄速率设定为 300 帧/s。选取 40 颗玉米颗粒,将变频器调节到试验所需频率后,启动电机,通过变频器转换电机转速,利用高速摄像机拍摄试验装置主轴不同转速下颗粒群的分散情况。利用高速摄像后处理软件 Phantom 建立绝对坐标系,创建坐标原点,选取筛面上具有代表性的玉米颗粒作为追踪对象,由人眼逐帧进行跟踪,提取帧数间隔为 15 帧,利用软件读取单颗粒在不同时刻的坐标。

3.3 试验指标

以分散度为试验指标,以主轴转速为试验因素。采用 T_{xz} 评价颗粒群沿筛面长度和宽度方向的分散情况^[17]。

设沿筛面长度方向为 x 方向,沿筛面宽度方向为 z 方向,竖直方向为 y 方向。将振动筛筛面上某时刻物料在振动筛 x 、 z 轴上的坐标记为 (x_{ii}, z_{ii}) , t 为测量时刻, i 为颗粒序号, $i = 1, 2, \dots, k$ 。将 40 颗籽粒作为试验样本,从而通过分析样本的 T_{xz} 来进一步分析颗粒群在 x 、 z 方向的分散程度。则在任意时刻 t , 用颗粒在 x 、 z 方向坐标值的算术平均值 $\bar{x}_{ii}$ 、 $\bar{z}_{ii}$ 来表示颗粒群在振动筛筛面上的集聚中心坐标值,有

$$\bar{x}_{ii} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{ii} \tag{19}$$

$$\bar{z}_{ii} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_{ii} \tag{20}$$

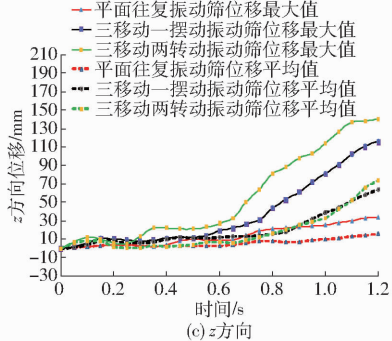
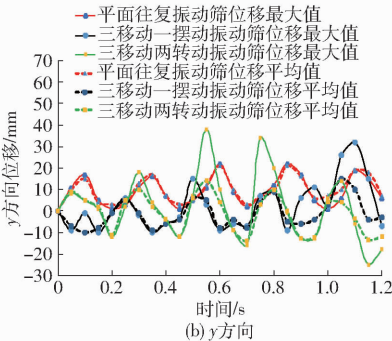
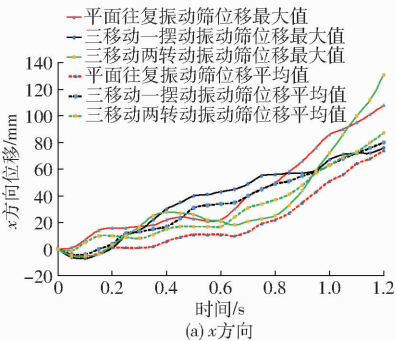


图 10 3 种振动平板上颗粒位移对比

Fig. 10 Comparison of particle displacement on three types of vibrating plate

因为标准偏差可以反映样本颗粒在集聚中心的离散程度,标准偏差越大,表明颗粒群的分散程度越好,因此,采用样本坐标的标准偏差来衡量不同振动平板上颗粒群的分散程度,则 t 时刻颗粒群沿筛面 x 、 z 方向样本标准差计算式为^[17]

$$S_{xt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_{ii} - \bar{x}_{ii})^2}{k - 1}} \tag{21}$$

$$S_{zt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (z_{ii} - \bar{z}_{ii})^2}{k - 1}} \tag{22}$$

将物料颗粒运动的时间分为 m 个时间段,得到基于平板上颗粒沿 x 、 z 方向综合分散度评价指标为^[17]

$$T_{xz} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \sqrt{\frac{S_{xt}^2 + S_{zt}^2}{2}} \tag{23}$$

3.4 试验结果与分析

3.4.1 颗粒运动位移

将颗粒在不同时刻 x 、 y 、 z 方向的坐标分别连接,获得颗粒在不同方向的运动轨迹,如图 10 所示。

由图 10a 可知,随着时间的增加,颗粒沿 3 种振动平板 x 方向的位移整体上呈现逐渐增大的趋势。在 0.6 s,颗粒群沿三移动一摆动振动平板 x 方向的位移最大,其次为三移动两转动振动平板、平面往复振动平板。表明在 0 ~ 0.6 s 内,三移动一摆动振动平板的运动形式更利于颗粒群沿平板

x 方向快速分散;在 1.2 s,由颗粒位移的平均值可知,颗粒群在三移动两转动振动平板上的位移和三移动一摆动振动平板上的位移大于在平面往复振动平板上的位移,表明三移动一摆动和三移动两转动振动平板较平面往复振动平板更利于颗粒沿 x 方向的快速分散。这是由于三移动一摆动和三移动两转动振动平板沿 z 方向的转动加速了平板对颗粒群沿 x 方向的推送能力。

由图 10b 可知,在平面往复振动平板中,颗粒位移沿平板 y 方向呈周期性变化,这与颗粒非线性理论分析的结果一致;颗粒沿三移动两转动振动平板和三移动一摆动振动平板 y 方向的最大位移分别为 38 mm 和 32 mm,体现了这两种振动平板的最大推送能力。颗粒沿 y 方向的位移变化较复杂,呈现混乱的运动趋势。这是因为随着时间的增加,三移动一摆动和三移动两转动振动平板具有多维运动,颗粒在每次跃起后再次与平板接触的位置具有随机性。当颗粒再次与平板接触时,颗粒在平板上可能发生上移、下移或伴随着平板摆动产生侧滑,故颗粒

在两种振动平板上产生混沌运动,这与颗粒非线性跳动理论分析的混沌运动结果一致。由于混沌运动的随机性,增加了物料与筛面的碰撞机会,从而提高颗粒群在三移动一摆动和三移动两转动振动筛筛面上的透筛几率。

在图 10c 中,由颗粒位移最大值和平均值可知,颗粒群在三移动两转动振动平板 z 方向的位移明显大于另外两种振动平板。这是由于三移动两转动振动平板较另外两种振动平板产生沿 x 方向的转动,该转动会使颗粒每次与平板接触时产生不同方向的碰撞,利于颗粒沿 z 方向向平板两端分散。

综上分析图 10a、10c 可得,颗粒在振动平板 x 与 z 方向的位移随着时间的变化呈现逐渐增大的趋势,说明颗粒群在平板 x 、 z 方向分散性逐渐增大,利于颗粒沿平板 x 、 z 方向的分散,有效增加了平板的利用面积。

3.4.2 颗粒运动速度

根据位移与时间之比获得速度,将颗粒不同时刻的速度依次连接,获得颗粒速度曲线,如图 11 所示。

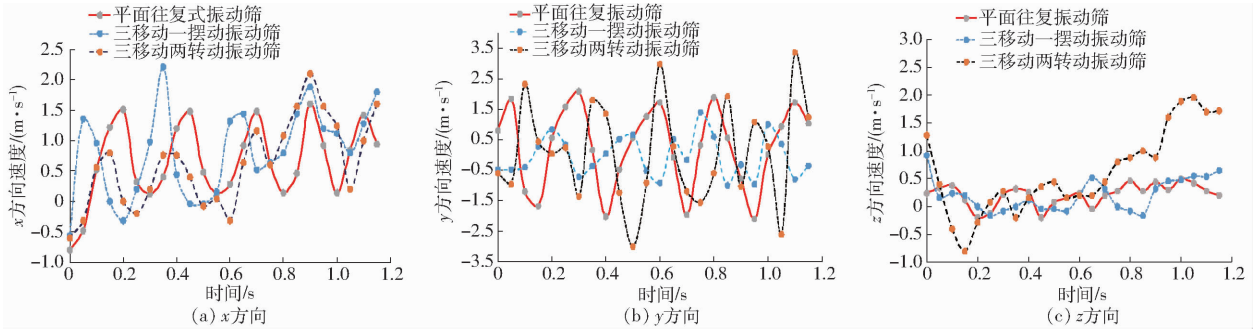


图 11 3 种振动平板上颗粒速度变化曲线

Fig. 11 Velocities curves of particle on three types of vibrating plate

由图 11a 可知,在平面往复振动平板上,颗粒沿 x 方向的速度呈周期性变化,在运动 0.1 s 之后,速度值始终为正值,表明颗粒沿平板呈一直往筛后运动的状态;在三移动一摆动振动平板和三移动两转动振动平板上颗粒运动混乱,速度变化范围分别为 $-0.56 \sim 2.21$ m/s、 $-0.60 \sim 2.10$ m/s。说明颗粒在筛面上做前后往复运动,该运动形式增加了颗粒与筛面的碰撞时间,利于颗粒透筛。1.2 s 时,颗粒沿筛面 x 方向,在三移动一摆动振动筛上的速度大于三移动两转动振动筛上的速度和平面往复振动筛上的速度。

由图 11b 可知,颗粒在平面往复、三移动一摆动、三移动两转动振动平板上,沿 y 方向的速度变化范围分别为 $-2.10 \sim 1.88$ m/s、 $-1.01 \sim 1.40$ m/s、 $-2.60 \sim 3.36$ m/s。1.2 s 时,颗粒沿筛面 y 方向,颗粒在三移动两转动振筛上的速度与平面往复振动筛上的速度相近,均大于三移动一摆动振动筛上的速

度。

由图 11c 可知,颗粒在三移动两转动振动平板上,沿 z 方向的速度变化范围最大,其速度变化范围为 $-0.80 \sim 1.96$ m/s,利于颗粒沿平板 z 方向快速分散。而在平面往复和三移动一摆动振动平板上速度变化范围很小,其速度变化范围分别为 $-0.20 \sim 0.46$ m/s、 $-0.16 \sim 0.92$ m/s,这是由于三移动两转动振动筛产生的沿平板 x 方向的转动较三移动一提动振动筛产生的沿 x 方向的移动效果更佳。1.2 s 时,颗粒沿筛面 z 方向,在三移动两转动振动筛上的速度大于三移动一摆动振动筛和平面往复振动筛上的速度。

3.4.3 不同转速下颗粒群的分散度

根据颗粒不同时刻的坐标,以及分散性指标计算公式获得 3 种振动筛不同主轴转速下颗粒群的分散度,确定 3 种振动平板上颗粒群最佳分散度对应的主轴转速,如图 12 所示。

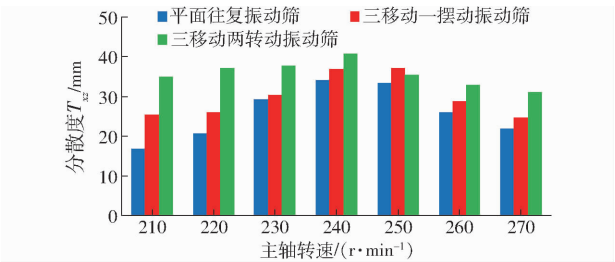


图 12 分散度随主轴转速的变化

Fig. 12 Variation of dispersion with spindle speed

由图 12 可知,随着主轴转速逐渐增大,颗粒群在 3 种振动平板上的分散度都呈现先增大后减小的变化规律。在平面往复振动平板上,随着主轴转速逐渐增大,颗粒群的分散度具有较显著的变化。当主轴转速为 240 r/min 时,颗粒群的分散度 T_{xz} 达到最大,表明颗粒群在平面往复振动平板上最优分散度对应的最佳主轴转速为 240 r/min;在三移动一摆动振动平板和三移动两转动振动平板上,当主轴转速由 210 r/min 增大至 270 r/min 时,颗粒群的分散度变化幅度明显,颗粒群最优分散度对应的最佳主轴转速分别为 250 r/min 和 240 r/min。

3.4.4 主轴最优转速下颗粒群的分散度

在 3 种振动筛主轴最优转速下,跟踪不同时刻颗粒群的分散情况,如图 13 所示。

由图 13 可知,当筛分时间为 0.6 s 时,颗粒群在三移动一摆动振动平板上的分散效果较三移动两转动和平面往复振动平板上好,此时颗粒群在三移动一摆动振动平板上的综合分散度为 29.71 mm,见表 1。这与图 11a 中分析的速度结果相一致;当筛分时间为 1.2 s 时,颗粒群在平面往复振动平板上呈现局部堆积状态,如图 13a 所示。此时,利用高速摄像后处理软件根据公式 (23) 求得颗粒群的综合分散度为 59.32 mm,见表 1。由图 13b 可知,当筛分时间为 1.2 s 时,颗粒群在三移动一摆动振动平板上呈均匀分散,但整体分散度低于三移动两转动的分散度,颗粒群在三移动一摆动振动平板和三移动两转动振动平板上的综合分散度分别为 62.08 mm 和 70.08 mm。此外,颗粒群沿三移动一摆动振动平板 z 方向的分散度 ($\bar{S}_{zi} = 29.60$ mm) 小于颗粒群沿三移动两转动振动平板 z 方向的分散度 ($\bar{S}_{zi} = 34.28$ mm),说明沿平板 z 方向,三移动两转动振动更利于颗粒物料的分散。这是由于三移动两转动振动能够实现沿平板 x 方向的转动,该转动致使颗粒群有更多的机会沿平板 z 方向实现快速分散。由图 13c 可知,颗粒群在三移动两转动振动平板上呈较均匀分散状态,这是由于颗粒群在三移动两转动

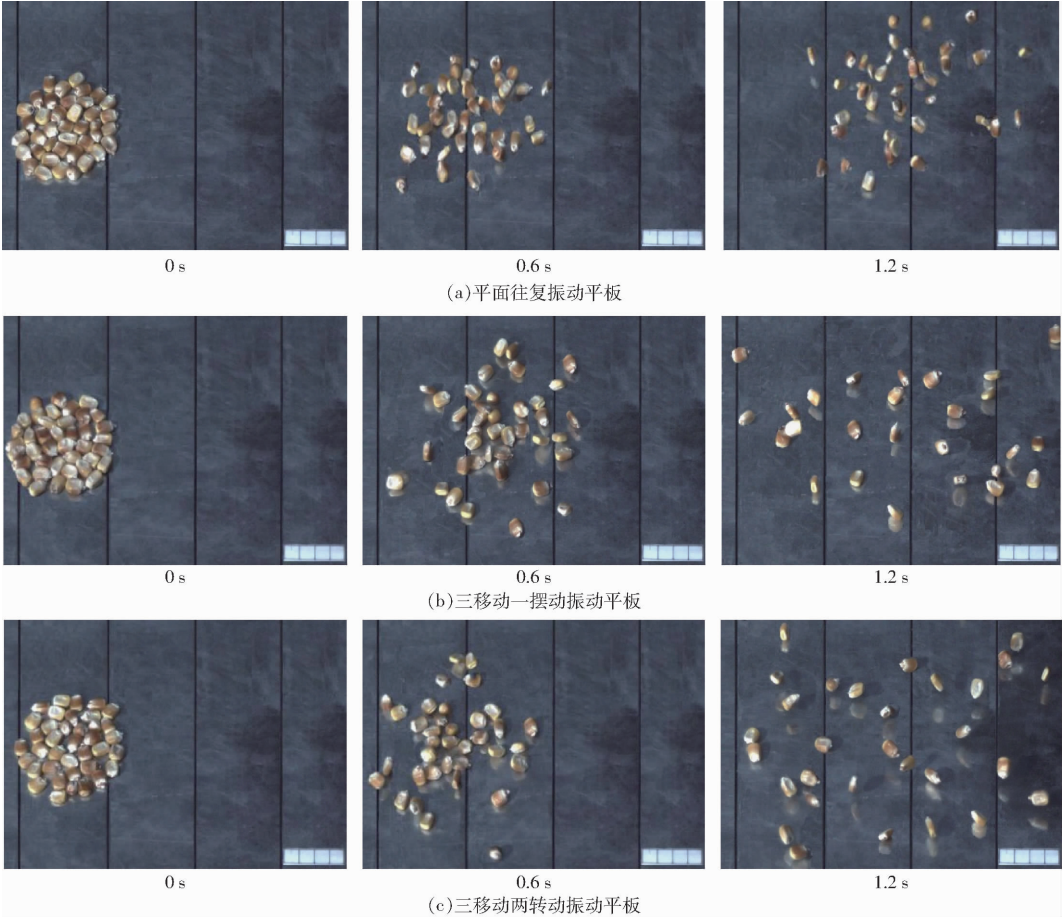


图 13 颗粒群在振动平板 x, z 方向上分散度变化过程

Fig. 13 Variation process of dispersivity of particle group in x, z direction on vibrating plate

振动平板上不但可以实现 x 、 y 、 z 方向的移动,还可以实现沿 x 方向与 z 方向的转动。且筛面沿 x 方向的转动有助于颗粒随着筛面跳动,利于颗粒在筛面 z 方向分散。

综上分析,筛分时间为 1.2 s 时,三移动两转动

振动平板上颗粒群的综合分散效果优于三移动一摆动振动平板,和平面往复振动平板。说明三移动一摆动和三移动两转动实现的多维运动形式较平面往复振动实现的平面运动形式更利于加速颗粒群在振动平板上的分散。

表 1 颗粒群分散度对比
Tab.1 Dispersion comparison of particle groups

时刻 t/s	平面往复式振动			三移动一摆动振动			三移动两转动振动		
	S_{xf}	S_{zf}	T_{xz}	S_{xf}	S_{zf}	T_{xz}	S_{xf}	S_{zf}	T_{xz}
0.3	16.21	14.16	15.22	25.06	17.41	21.58	16.50	24.80	21.06
0.6	22.73	18.43	20.69	35.01	23.24	29.71	23.80	29.80	26.97
0.9	49.04	30.99	41.02	50.87	31.92	42.47	54.60	32.20	44.82
1.2	71.68	43.59	59.32	74.89	45.81	62.08	85.40	50.30	70.08
平均值	39.92	26.79	34.06	46.46	29.60	38.96	45.08	34.28	40.73

由表 1 可知,在相同试验工况下,颗粒群在平面往复振动筛筛面上的综合分散度为 34.06 mm,颗粒群在三移动一摆动和三移动两转动振动筛筛面上的综合分散度分别为 38.96 mm 和 40.73 mm,较平面往复振动筛综合分散度分别提高 14.39% 和 19.58%,有效提高了颗粒群物料在筛面上的分散程度,减少了颗粒群在筛面上的堆积,增加了筛面的实际筛分面积,提高了筛分效率。同时,三移动两转动较三移动一摆动多 1 个沿 x 方向的转动,综合分散度提高了 4.54%。说明沿 x 方向的转动对颗粒群的分散效果具有显著作用。

4 物料筛分试验

为验证分散性平板试验的可行性及试验结果的正确性,用振动筛筛面代替振动平板,进行物料筛分验证试验,清选装置筛面采用圆孔筛(筛孔直径、纵向间距和横向间距分别为 15、30、17.5 mm),筛面长度为 1 360 mm,宽度为 1 100 mm,筛体厚度为 2 mm,筛面振动频率为 4 Hz,筛面振幅为 19.5 mm,筛面安装倾角为 3.5°,在清选装置前端安装抖动板喂入谷物,安装夹角为 1.74°,抖动板尾部与筛面垂直距离约 75 mm,根据《农业机械设计手册》要求,抖动板尾部高于筛面最大距离为 100 mm。试验连续 5 s 喂入 25 kg 玉米脱出物,将玉米脱出物按比例(玉米籽粒占 73.3%、玉米茎秆占 17.6%、玉米芯占 8.7%、轻质杂余占 0.4%^[19])称量后均铺在抖动板上,以保证喂入量为 5 kg/s,如图 9 所示。以分散度和筛分效率作为试验指标,对玉米脱出物在 3 种振动筛筛面上进行分散性高速摄像台架试验,实时追踪玉米颗粒群的分散情况,结果如图 14 所示。通过提取试验数据,获得分散度、筛分效率与时间之间的关系,如图 15 所示。

随着筛分时间的增加,玉米脱出物在平面往复振动筛筛面上呈现向筛面一侧局部堆积的状态,如图 14a 所示。这一结果与平板试验结果相一致,说明简单的往复运动形式不利于颗粒在筛面上快速透筛;在筛分 2.4 s 时,三移动一摆动振动筛的筛分效果优于平面往复振动筛的筛分效果,如图 14b 所示。这是由于三移动一摆动振动筛较平面往复振动筛产生了沿筛面 z 方向的移动与摆动,更利于颗粒与筛面的接触,增加了颗粒的透筛几率;在三移动两转动振动筛筛面上,玉米脱出物的分散度最好,相同时刻,透筛效率最高。

在筛分 2.4 s 时,颗粒留在三移动两转动振动筛筛面上的数目少于三移动一摆动振动筛筛面上的数目,并少于平面往复振动筛筛面上的数目。这是由于颗粒群在筛面上的分散度越好,颗粒群与筛面的接触几率越多,颗粒透筛机会就越大。

由图 15 可知,随着筛分时间增加,筛分效率与分散度都逐渐增大,说明颗粒群的分散度与筛分效率呈同步变化趋势,物料筛分试验证明了分散度越大,筛分效率越高。由图 15 可得,在 0.2 ~ 0.4 s 和 0.6 ~ 0.8 s 时间内,三移动两转动振动筛筛分效率变化很大,说明在这段时间内颗粒群的分散度很大,颗粒大量透筛。而在 0.8 ~ 1.2 s 时,三移动两转动振动筛的分散度逐渐增大,但筛分效率逐渐趋于平缓,颗粒群接近完全透筛。

由图 14 和图 15 分析可知,3 种振动筛的筛分效率由高到低依次为:三移动两转动振动筛、三移动一摆动振动筛、平面往复振动筛。物料筛分试验结果与平板试验结果相一致。筛分试验证明了用平板对颗粒群分散度进行研究的可行性,同时也验证了平板试验结果的正确性。

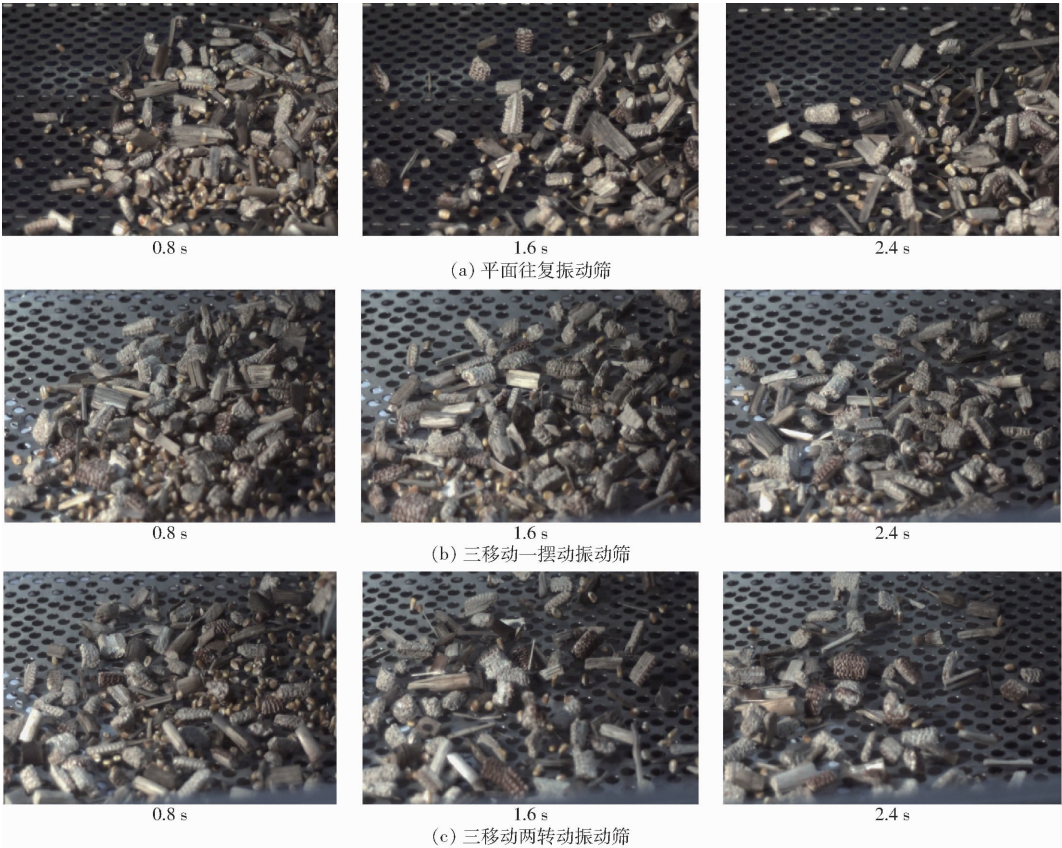


图 14 颗粒群在 3 种振动筛筛面上的分散度

Fig. 14 Dispersion of particles in three kinds of vibrating screen

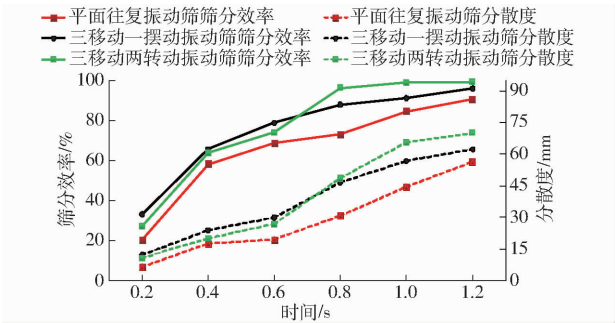


图 15 筛分效率、分散度与时间的关系曲线

Fig. 15 Relationship curves between screening efficiency and dispersion and time

5 结论

(1)颗粒在平面往复振动筛上沿筛面长度方向依次呈现混沌运动、倍周期分岔运动、周期运动、Hopf 分岔运动、混动运动,而在三移动一摆动和三

移动两转动振动筛筛面上呈现混沌运动。
(2)颗粒在振动平板上的运动规律证明了颗粒非线性跳动理论分析结果的正确性,随着主轴转速逐渐增大,颗粒群在 3 种振动平板上的分散度均呈现先增大后减小的变化规律。
(3)在振动筛主轴最优转速下,玉米颗粒群在三移动一摆动和三移动两转动振动平板上的综合分散度分别为 38.96 mm 和 40.73 mm,较平面往复振动平板分别提高了 14.39%、19.58%。
(4)玉米脱出物喂入量为 5 kg/s 时,随着物料筛分时间的增加,筛分效率与分散度均呈逐渐增长趋势,分散度越大,筛分效率越大。3 种振动筛的筛分性能由高到低依次为:三移动两转动振动筛、三移动一摆动振动筛、平面往复振动筛。证明了用平板对颗粒群分散度进行研究的可行性及平板试验结果的正确性。

参 考 文 献

[1] 李耀明. 水稻梳脱混合物复脱分离、清选特性的研究[D]. 南京:南京农业大学,2004.
LI Yaoming. Study on separation of rethreshed stripped mixtures and their cleaning characteristics for rice [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University,2004. (in Chinese)
[2] 徐立章,李耀明,张立功,等. 轴流式脱粒—清选装置试验台的设计[J]. 农业机械学报,2007,38(12):85-88.
XU Lizhang,LI Yaoming,ZHANG Ligong,et al. Development on test-bed of axial threshing and cleaning unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(12):85-88. (in Chinese)
[3] 杨晓彬. 三维振动筛的设计及透筛过程中颗粒物料运动仿真[D]. 镇江:江苏大学,2009.

- YANG Xiaobin. Design of three-dimension vibrating screen and material's motion simulation during screening process [D]. Zhenjiang :Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- [4] 张路霞,李云峰. 振动筛筛分效率的影响因素分析[J]. 煤矿机械,2008,29(11):74-76.
ZHANG Luxia,LI Yunfeng. Analysis of influence factor in shaker screening efficiency[J]. Coal Mine Machinery,2008,29(11):74-76. (in Chinese)
- [5] 刘晓飞. 农业物料在三自由度风筛清选中的运动仿真及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2017.
LIU Xiaofei. Motion simulation and experimental study of agricultural materials in 3-DOF air and screen cleaning device [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2017. (in Chinese)
- [6] 王成军. 典型农业物料在三维并联振动筛中的筛分理论与试验[D]. 镇江:江苏大学,2012.
WANG Chengjun. Screening theory and experiment of typical agricultural materials on the three-dimensional parallel vibration screen[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2012. (in Chinese)
- [7] WANG L J, DING Z J, MENG S, et al. Kinematics and dynamics of a particle on a non-simple harmonic vibrating screen[J]. Particuology,2017,32:167-177.
- [8] 王成军,刘琼,马履中,等. 棉籽颗粒在三自由度混联振动筛面上的运动规律[J]. 农业工程学报,2015,31(6):49-56.
WANG Chengjun, LIU Qiong, MA Lüzhong, et al. Cottonseed particle motion law in 3-DOF hybrid vibration screen surface [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(6):49-56. (in Chinese)
- [9] 马履中,林钰珍,杨文亮,等. 基于颗粒运动的多维振动筛分效率分析[J]. 农业机械学报,2009,40(10):62-66.
MA Lüzhong, LIN Yuzhen, YANG Wenliang, et al. Analysis on efficiency of the dimensional vibration sieve based on the movements of grains [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(10):62-66. (in Chinese)
- [10] 赵跃民,张曙光,焦红光,等. 振动平面上粒群运动的离散元模拟[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(5):586-590.
ZHAO Yumin,ZHANG Shuguang,JIAO Hongguang,et al. Simulation of discrete element of particles motion on the vibration plane[J]. Journal of China University of Mining and Technology,2006,35(5):586-590. (in Chinese)
- [11] 刘琼. 三自由度混联振动筛及颗粒群运动规律研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2016.
LIU Qiong. Study on 3-DOF hybrid vibration screen and particle motion law in screen surface[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology,2016. (in Chinese)
- [12] 刘初升,陆金新. 筛分过程中颗粒运动的非线性特性研究[J]. 煤炭学报,2009,34(4):556-559.
LIU Chusheng, LU Jinxin. Study on the nonlinear characteristic of particle motion during the process of coal screening[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(4):556-559. (in Chinese)
- [13] 刘初升,赵跃民. 振动筛面上单颗粒运动的非线性特性的研究[J]. 矿山机械,1999(1):45-46.
- [14] 沈惠平,张会芳,张江涛,等. 并联运动振动筛的筛分运动规律及其轨迹的研究[J]. 机械设计,2008,25(12):20-24.
SHEN Huiping, ZHANG Huifang, ZHANG Jiangtao, et al. Study on the movement regularity and trajectory of the shunt vibrating screen[J]. Mechanical Design,2008,25(12):20-24. (in Chinese)
- [15] 沈惠平,王新翔,邓嘉鸣,等. 并联振动筛与直线筛筛分效果的试验比较研究[J]. 矿山机械,2012,40(5):79-83.
SHEN Huiping, WANG Xinxiang, DENG Jiaming, et al. Experimental comparison study on screening performance between parallel vibrating screen and linear vibrating screen[J]. Mining & Processing Equipment,2012,40(5):79-83. (in Chinese)
- [16] 李菊,王增彪,沈惠平,等. 凸柱筛面并联振动筛的谷物筛分试验与分析[J]. 机械设计与研究,2016,32(1):150-154,158.
LI Ju, WANG Zengbiao, SHEN Huiping, et al. Experiment and analysis of parallel vibrating sieve with convex column screen surface on grain screening [J]. Machine Design and Research, 2016,32(1):150-154,158. (in Chinese)
- [17] 李菊,曾氢菲,邓嘉鸣,等. 多维并联振动筛筛分过程解析与筛面运动形式优选[J]. 农业机械学报,2016,47(11):399-407.
LI Ju, ZENG Qingfei, DENG Jiaming, et al. Screening process analysis for multi-dimensional parallel vibrating screen and optimization of screen surface movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):399-407. (in Chinese)
- [18] PAUL W C, MATTHEW D S, ROB D M. Separation performance of double deak banana screens—Part2: quantitative predictions[J]. Minerals Engineering,2009,22(14):1230-1244.
- [19] 王立军,段良坤,郑招辉,等. 三移动两转动振动筛驱动机构优化试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):138-145.
WANG Lijun,DUAN Liangkun,ZHENG Zhaozhui,et al. Optimization and experiment on driving mechanism of vibrating screen with three translations and two rotations[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):138-145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180616&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.016. (in Chinese)
- [20] 刘秉承. 非线性动力学与混沌基础[M]. 长春:东北师范大学出版社,1994.
- [21] 李耀明,赵湛,陈进,等. 风筛式清选装置上物料的非线性运动规律[J]. 农业工程学报,2007,23(11):142-147.
LI Yaoming,ZHAO Zhan,CHEN Jin,et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(11):142-147. (in Chinese)
- [22] WANG Lijun, ZHOU Wenxiu, DING Zhenjun, et al. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions[J]. Powder Technology, 2015, 284:187-194.