

多维并联振动筛筛分过程解析与筛面运动形式优选

李菊 曾氢菲 邓嘉鸣 沈惠平 熊坤

(常州大学现代机构学研究中心, 常州 213016)

摘要: 针对物料在多维并联振动筛筛面上的运动过程及其规律不明确,以及采用何种筛面运动形式最佳的问题,研究了物料颗粒在多维振动筛筛面上的运动过程,并提出最佳的筛面运动形式。引入分散度与分层速率2个指标,基于颗粒离散单元法(DEM)研究各单自由度振动对筛面上物料分散和分层过程的影响,优选出分散度和分层速率较优的4个单自由度振动,即:分别沿筛面长度、宽度和高度方向的移动 x 、 y 和 z ,以及绕筛面法线方向的转动 γ ,其中, x 和 y 单自由度振动效果尤为明显。在优选振动自由度组成的各种振动形式下,基于筛分效率和含杂率,对多维振动筛面的物料透筛过程进行模拟研究,表明:3平移1转动(3T-1R)四维振动形式透筛性最好,为理想的筛面运动。据此设计了一种3T-1R并联机构,并在样机上进行了筛分试验验证。

关键词: 多维并联振动筛; 筛分过程; 筛面运动形式; 离散单元法

中图分类号: TH237+.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0399-09

Screening Process Analysis for Multi-dimensional Parallel Vibrating Screen and Optimization of Screen Surface Movement

Li Ju Zeng Qingfei Deng Jiaming Shen Huiping Xiong Kun

(Research Center for Advanced Mechanism Theory, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Coworkers and authors have put forward the concept of multi-dimensional parallel vibrating screen, and made prototype design and experimental analysis. However, the movement process of materials on the multi-dimensional vibrating screen and the problems of ideal sieve surface movement have not been solved yet. In this paper, the material movement process and the ideal screen surface movement of the multi-dimensional parallel vibrating screen were studied. First of all, two important indexes were imported, including the dispersion degree and layering rate, and the effect of six single degree of freedom (DOF) vibrations of screen surface on the material dispersion and layering process based on discrete element method (DEM) were analyzed, so the four single degree of freedom vibrations of screen surface were optimized which were more conducive to the material dispersion and layering process, that was three translations x , y , and z along the length, width and height of screen surface respectively, and a rotation γ around the normal of screen surface. Among them, the effects of the x and y single degree of freedom vibrations of screen surface were particularly obvious. Then according to screening efficiency and impurity rate, screening process of material on the multi-dimensional vibration sieve was simulated based on various vibration movement forms consisted of the four single degree of freedom vibrations selected. The results showed that three translational and one rotational 4-DOF vibration form $xyz\gamma$ had the best screen permeability, which was selected as the ideal screen surface movement form. Finally, according to the ideal screen surface movement, a 3T-1R parallel mechanism was designed, the prototype was developed, and the screening test was carried out on the prototype. The work of this paper provided a solid theoretical basis for the design of the multi-dimensional parallel vibrating screen and the selection of

the optimum screening parameters.

Key words: multi-dimensional parallel vibrating screen; screening process; screen surface movement form; discrete element method

引言

筛分作业是一种有效的物料按粒度分级的方法,广泛应用于矿业、冶金、食品等诸多领域,是一种重要的工业基础装备。传统振动筛大致可分为3类:①基于激振器的圆惯性振动筛和直线惯性振动筛。②基于激振器的等厚筛和复频振动筛。③基于平面连杆机构的连杆式振动筛。这些传统振动筛存在筛面运动轨迹单一、结构复杂、筛分效率低等缺点。为克服这些缺点,人们对筛网结构、振动强度、筛面驱动机构等进行了大量的研究工作^[1-3]。

文献[4-14]的研究为多维并联振动筛机构的设计和优选提供了一定的依据和方法,但这些并联振动筛机构的选型设计仍带有较大的主观性、经验性,且多数集中于3自由度的并联机构,较少涉及4~6自由度的并联机构。因此对于理想的筛面运动形式仍缺乏全面的分析研究,有待深入。

为满足振动筛进行多种振动形式和振动参数的筛分试验需求,人们应用颗粒离散元法(DEM)^[15]模拟和分析物料筛分过程^[16-30]。但人们对物料在多维并联振动筛面上的运动过程及规律研究较少。本文利用离散元颗粒仿真软件(EDM)解析多维并联振动筛的筛分过程。研究6个单自由度振动对颗粒筛分的影响,引入分散度与分层速率2个评价指标,用于研究颗粒在振动筛面上的分散和分层过程;根据分散和分层的试验结果,对各种振动形式下筛面物料的透筛过程进行模拟研究,根据筛分效率和含杂率指标,优选出透筛性最好的振动形式作为理想的筛面运动形式,并研制样机进行筛分试验验证。

1 筛分过程及评价指标

振动筛面上物料的筛分过程一般分为分散、分层和透筛3个过程,这3个过程相互交错又互相影响,其中,物料运动是物料群分散和分层的前提条件,而分散和分层的效果又影响着细颗粒的透筛行为。在筛分开始阶段,堆积在一起的物料在振动筛的作用下首先在筛面上分散,此时,仅有一部分细颗粒与振动筛面直接接触而发生透筛,其它颗粒则在振动筛的作用下产生相对运动。在物料群运动的过程中,由于料层中不同颗粒粒度大小的差异,细颗粒逐步穿越料层中粗颗粒的间隙,下沉到料层底部而实现细颗粒的透筛;同时粗颗粒受到排挤,逐渐上浮

到料层上部,即物料群发生小颗粒下沉、大颗粒上浮的分层现象。随着大小颗粒间不断发生的分层运动,更多小颗粒下沉而获得与筛面碰撞、接触的机会,进而实现细颗粒的透筛。可见,物料的运动状态决定了物料分散和分层的速度和完善程度,而分散和分层的好坏直接决定了筛分效果^[29]。

影响振动筛面上物料运动状态的因素很多,包括筛面运动形式、筛面倾角、振幅、频率、颗粒的长径比、掺杂率等,其中,筛面运动形式是一个重要因素。对于多维振动筛面而言,首先要确定筛面的多维运动形式,这就需要选用合理的筛分效果评价指标,对振动筛面的各种运动形式进行筛分研究,以确定理想的筛面运动形式。

1.1 分散指标

筛面上物料的分散效果直接与筛面的运动形式有关。由于多维并联振动筛筛面的运动形式不同于传统往复振动筛筛面的单一运动,因此考察和评价多维并联振动筛面上物料颗粒群的运动状态和分散情况,需要建立符合多维振动形式筛面的物料分散度评价指标。文献[11]基于三自由度振动筛面的三维运动形式提出2类分散度的评价指标:一类是用于考察物料沿筛面长度和宽度方向的分散情况,表示为 T_{xy} ;另一类是用于考察筛面上物料沿高度方向的堆积情况,表示为 H_z ,具体定义如下。

(1) T_{xy} 计算

将 X 向设为筛面的长度方向, Y 向设为筛面的宽度方向, Z 向则为垂直筛面的方向。将振动筛面上某物料颗粒某时刻在 X 、 Y 坐标轴上的坐标值记为: x_{it} 、 y_{it} ,则在任意 t 时刻,颗粒位置的样本标准差计算式为

$$\begin{cases} S_{xt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(x_{it} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{it}\right)^2}{n-1}} \\ S_{yt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(y_{it} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{it}\right)^2}{n-1}} \end{cases} \quad (1)$$

式中 t ——测量时刻 i ——颗粒序号
 n ——颗粒数目

然后,将物料颗粒运动的时间分为 m 个分时间,得到基于筛面上颗粒沿 X 和 Y 方向的分散位移的分散度评价指标

$$T_{xy} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{S_{xi}^2 + S_{yi}^2}{2}} \quad (2)$$

(2) H_z 计算

首先定义一无量纲数

$$h_{zt} = \frac{h_t}{h_0} \quad (3)$$

式中 h_{zt} —— t 时刻筛面上物料分散度的

h_t —— t 时刻筛面上物料顶层颗粒距离筛面的高度

h_0 ——物料开始运动时, 筛面上物料顶层颗粒距离筛面的高度

为计算方便, 将筛面上物料沿筛面宽度方向等距划分为 s 列, 将得到 s 列物料分散度的平均值 \bar{h}_{zt} 。将测试时间分为 m 段分时间, 为使 \bar{h}_{zt} 更具代表性, 取每个分时间内的最大值 \bar{h}_{zmax} 作为 t 时刻筛面上物料堆积高度的分散度指标, 则可得到测试时段内基于筛面上颗粒堆积高度的分散度评价指标

$$H_z = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{h}_{zmax} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\frac{\sum_{j=1}^s h_{ij}}{sh_0} \right]_{\max} \quad (4)$$

1.2 分层指标

为了考察和评价多维振动筛面上物料颗粒群的分层情况, 需要为物料的分层运动建立衡量指标。文献[23, 30]采用颗粒的体积浓度, 作为颗粒系统分层速度的衡量指标。在可视化的离散元模拟仿真中, 文献[11]将分层速度衡量指标简化为: 颗粒物料表层某一粒级的颗粒占其颗粒总数的百分比, 以此衡量不同运动状态下颗粒的分层情况。物料的分层速率指标 C_i 具体表示为

$$C_i(t) = \frac{N_i(t)}{N_{i0}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 $N_i(t)$ —— t 时刻物料表层第 i 个粒级颗粒的数量

N_{i0} ——第 i 个粒级颗粒的总数量

1.3 透筛指标

评定振动筛工艺效果的一个常用综合性指标是筛分效率 E , 它是指经过某时间段筛分后实际得到的筛下物质量与入筛物料中小于筛孔尺寸的粒级质量之比。本文中筛分效率 E 具体定义为

$$E = \frac{Q_1}{Q_0} \times 100\% \quad (6)$$

式中 Q_1 ——实际筛下稻谷籽粒的数量

Q_0 ——入筛物料中稻谷籽粒的总数量

筛分效率 E 越大, 说明筛分效果越好。

透筛率是衡量筛分效果的另一个重要指标, 它是指单位时间内筛分出的筛下物质量。本文中透筛率 p 具体定义为

$$p = \frac{Q_2}{t} \quad (7)$$

式中 Q_2 ——筛下物中稻谷籽粒的质量, g

t ——筛分时间, s

p 越大, 说明筛分效果越好。

评价筛分性能的好坏, 除了考察其筛分效率和透筛率的高低外, 还要考察筛下物中的含杂量。本文中杂率 R 定义为

$$R = \frac{Q_r}{Q_1} \times 100\% \quad (8)$$

式中 Q_r ——筛下物中短茎秆的数量

R 越小, 说明筛下物含杂率越小, 清洁率越高, 筛分效果越好。

2 分散试验及分析

2.1 分散试验条件

分散试验包括 2 部分, 第 1 部分是考察物料沿筛平面的分散情况, 即 T_{xy} , 记为分散试验 1; 第 2 部分是考察物料沿筛面高度方向的堆积情况, 即 H_z , 记为分散试验 2。

(1) 筛面运动形式

筛面的运动形式是影响振动筛筛分效果的重要因素。筛面最多可实现 6 维运动输出, 即: 沿筛面长度方向的移动, 记为 x ; 沿筛面宽度方向的移动, 记为 y ; 沿筛面高度方向的移动, 记为 z ; 绕筛面长度方向的转动, 记为 α ; 绕筛面宽度方向的转动, 记为 β ; 绕筛面法线方向的转动, 记为 γ 。为全面研究筛面的运动形式对振动筛筛分效果的影响, 将分别针对各振动自由度, 即 $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$, 进行物料的分散试验研究, 具体的振动参数见表 1, 其中 A_x, A_y, A_z 分别表示筛面移动 x, y, z 的幅值, 而 $A_\alpha, A_\beta, A_\gamma$ 分别表示筛面转动 α, β, γ 的幅值。

表 1 分散仿真参数

Tab. 1 Dispersed simulation parameters

试验序号	振动盒尺寸 (长×宽×高)/mm	振动频率 f /Hz	移动幅值 (A_x, A_y, A_z)/mm	转动幅值 ($A_\alpha, A_\beta, A_\gamma$)/(°)	籽粒数	分散时间 t /s
1	50×30×40	(1, 2, 3, 4, 5)	(2, 4, 6, 8, 10)	(1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5)	30	1.1
2	100×30×40	(1, 3, 5)	(2, 6, 10)	(1.5, 4.5, 7.5)	800	2

(2) 物料模型

颗粒设计为球形,半径为 1.5 mm。仿真中颗粒的物理属性和材料接触参数见表 2 和表 3。

表 2 材料物理参数

Tab.2 Material properties parameters

材料名称	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	剪切模量/MPa
颗粒	1 350	0.3	2.6
筛面(刚)	7 800	0.3	700

表 3 材料接触参数

Tab.3 Collision properties parameters

接触材料	恢复因数	静摩擦因数	动摩擦因数
颗粒-颗粒	0.2	1	0.01
颗粒-筛面	0.5	0.58	0.01

(3) 分散试验模型

建立颗粒碰撞发生的外部环境——振动盒,其尺寸见表 1,分散试验模型如图 1 所示。各组试验

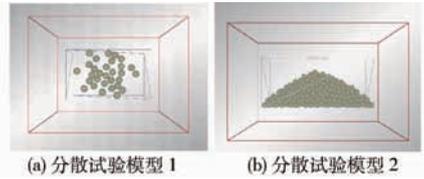


图 1 分散试验模型

Fig.1 Dispersion experimental models

采用相同的初始模型,针对相同振动时间,观察不同振动自由度下振动盒内物料颗粒的分散情况。

2.2 分散试验结果

由分散试验 1 确定 30 颗谷粒在仿真期间的位置,并根据式(1)、(2),计算筛面上颗粒在各振动自由度下的分散度指标 T_{xy} ,得到颗粒分散度随频率、幅值的变化情况,如图 2 所示。然后,将颗粒数增加到 800 颗,由分散试验 2 研究不同振动自由度下,筛面高度方向物料颗粒的分散情况,并根据式(4),计算分散度指标 H_z ,结果如图 3 所示。

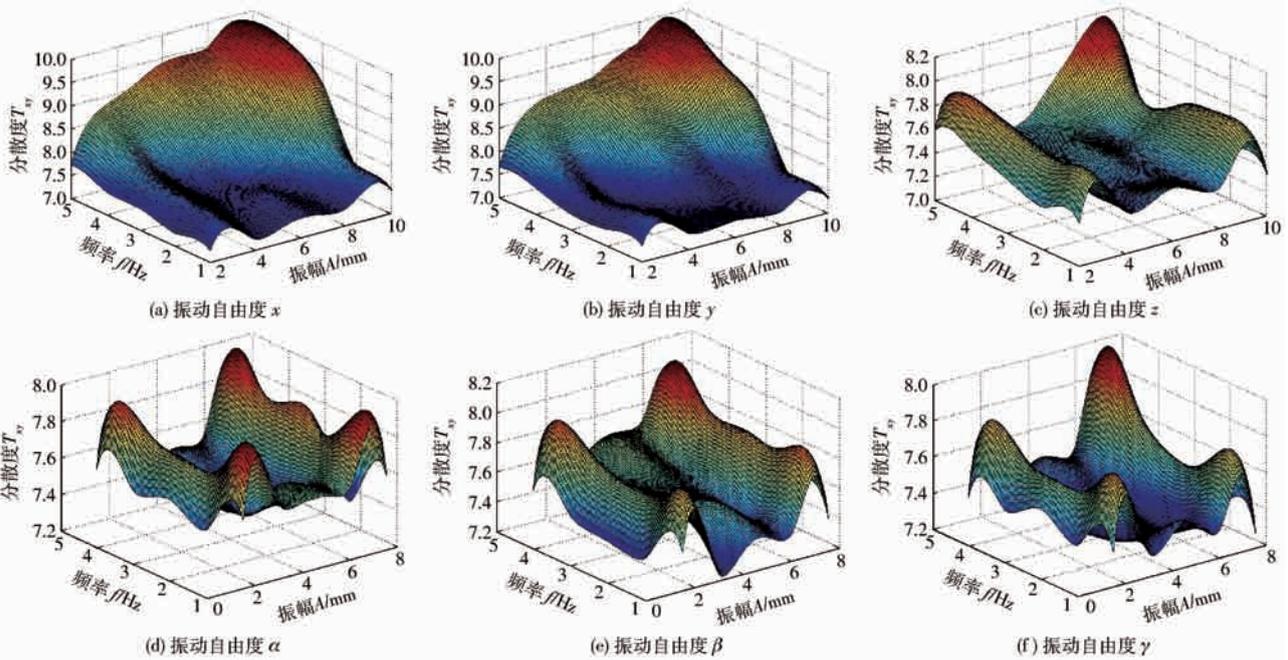


图 2 分散度指标 T_{xy} 随幅值、频率变化图

Fig.2 Dispersion T_{xy} varied with amplitude and frequency

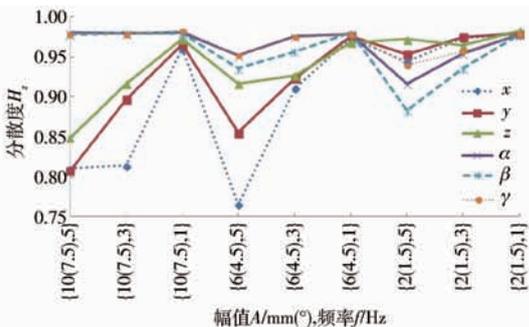


图 3 分散度 H_z 比较

Fig.3 Comparison of dispersion H_z

2.3 分散试验结果分析

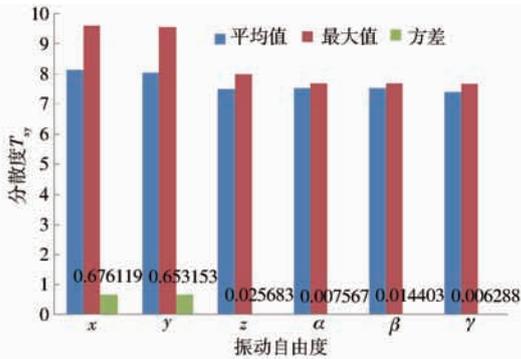
根据图 2 中各个振动自由度的分散度指标 T_{xy} 的计算值,综合考虑其平均值及方差,如图 4 所示。

由图 3 和图 4 可得,筛面物料在各单自由度振动下的分散度的排序结果为: $x > y > z > \beta > \alpha > \gamma$; 且 x 和 y 单自由度振动下的分散度,明显高于其它 4 个振动自由度的分散度。

3 分层试验及分析

3.1 分层试验条件

筛面运动形式与分散试验相同。为更好地研究

图 4 分散度 T_y 比较Fig. 4 Comparison of dispersion T_y

振动筛面上物料的分层过程,采用 2 000 颗半径 1.5 mm 和 160 颗半径 3 mm 的 2 种球形颗粒作为物料模型。仿真中颗粒的物理属性和材料接触参数参见表 2 和表 3。振动盒模型的几何尺寸为:150 mm (长) × 45 mm (宽) × 40 mm (高);振动参数为:移动幅度 A_x 、 A_y 、 A_z 都设置为 8 mm,转动幅度 A_α 、 A_β 、 A_γ 都设置为 7.5° ,振动频率 f 设置为 5 Hz。

在振动盒振动前,大、小颗粒分别位于振动盒的下层和上层。为保证试验的严谨性,各组试验采用相同的初始模型,针对相同振动时间 15 s,观察不同振动自由度下振动盒内物料颗粒的分层情况。

3.2 分层试验结果

根据式(5),计算筛面上颗粒在各振动自由度下的分层指标,得到的颗粒分层结果如图 5 所示。

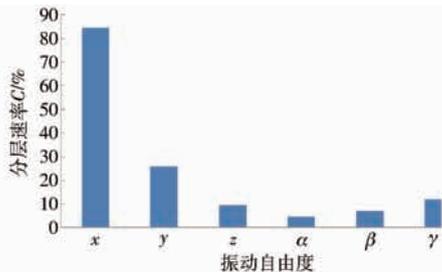


图 5 分层速率比较

Fig. 5 Comparison of hierarchical rate

3.3 分层试验分析

从图 5 中可看出,筛面物料在各单自由度振动下的分层速率的排序结果为: $x > y > \gamma > z > \beta > \alpha$;且 x 和 y 单自由度振动下的分层速率,明显高于其它 4 个振动自由度的分层速率。该试验结果与分散度试验结果大体一致,除了振动自由度 γ 的排序出现了特殊情况。这是由于分层时采用了一定厚度的物料,即 2 000 个小颗粒和 160 个大颗粒,而分散试验 1 和分散试验 2 分别采用了较薄的物料,即 30 个和 800 个颗粒。由此可见,当筛面物料具有一定厚度时,振动自由度 γ 的效果就显现出来了。

4 透筛试验及分析

4.1 透筛试验条件

(1) 筛面多维运动形式

一方面,振动自由度 x 、 β 都使物料沿筛面长度方向运动,而振动自由度 y 、 α 都使物料沿筛面宽度方向运动;另一方面,从上述分散和分层的试验结果发现,振动自由度 x 、 y 的筛分效果分别明显优于 β 、 α 的效果,因此,选取 x 、 y 、 z 、 γ 4 个振动自由度进行理想筛面运动形式的优选。为充分研究各振动自由度及其组合对振动筛筛分性能的影响,需要对振动筛在 4 类振动类型,即单自由度(x 、 y 、 z 、 γ)、2 自由度(xy 、 xz 、 yz 、 $x\gamma$ 、 $y\gamma$ 、 $z\gamma$)、3 自由度(xyz 、 $xy\gamma$ 、 $xz\gamma$ 、 $yz\gamma$)和 4 自由度($xyz\gamma$),共 15 种振动形式下进行筛面物料的透筛模拟研究。而在很多实际生产中,由于筛面物料是沿着筛面的长度方向连续输送的,因而筛面长度方向,即文中 X 方向往往会作为振动筛必备的振动方向。在这种情况下,上述 4 类振动类型中,可能采用的振动模式为:单自由度(x)、2 自由度(xy 、 xz 、 $x\gamma$)、3 自由度(xyz 、 $xy\gamma$ 、 $xz\gamma$)和 4 自由度($xyz\gamma$),共 8 种振动形式。

(2) 物料模型

采用稻谷籽粒和短茎秆作为透筛试验的筛分对象。根据实际尺寸,籽粒设计为椭球形,长轴 7 mm,旋转半径 1.5 mm,模型如图 6 所示;短茎秆设计为圆柱形,长 22 mm,半径 3 mm,模型如图 7 所示。采用离散元法的软颗粒模型进行谷物混合物的透筛模拟研究。试验中选取稻谷籽粒 5 000 颗,短茎秆 500 根。物料及筛面材料的物理特性及材料接触参数如表 4、5 所示。



图 6 籽粒模型

Fig. 6 Particle model

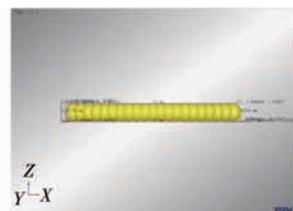


图 7 短茎秆模型

Fig. 7 Stem model

表4 材料物理参数

Tab.4 Material properties parameters

材料名称	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	剪切模量/MPa
籽粒	1380	0.3	2.6
短茎秆	100	0.4	1
筛面(刚)	7800	0.3	700

表5 材料接触参数

Tab.5 Collision properties parameters

接触材料	恢复因数	静摩擦因数	动摩擦因数
谷粒-谷粒	0.2	1	0.01
谷粒-短茎秆	0.2	0.8	0.01
谷粒与筛面	0.5	0.58	0.01
短茎秆与筛面	0.1	0.8	0.01

表6 透筛仿真参数

Tab.6 Screening simulation parameters

振动筛尺寸 (长×宽×高)/ mm×mm×mm	筛孔尺寸/ mm	振动形式	振动频率 f/Hz	移动幅度 (A _x ,A _y ,A _z)/mm	转动幅度 (A _α ,A _β ,A _γ)/(°)	透筛时间 t/s
200×100×70	Φ10	x,xy,xz,xγ, xyz,xyγ,xzy,xyzγ	5	6	3	2

件下,针对相同透筛时间,观察不同筛面运动形式下谷物颗粒的透筛情况。

4.2 透筛试验结果

根据式(6),计算振动筛在2s仿真时间内籽粒的透筛情况,结果如图9所示。另外,根据式(8),计算仿真结束时筛下物料的含杂率,结果如图10所示。

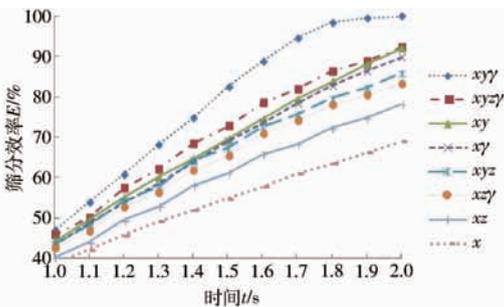


图9 各振动形式下的筛分效率比较

Fig.9 Comparisons of screening efficiency

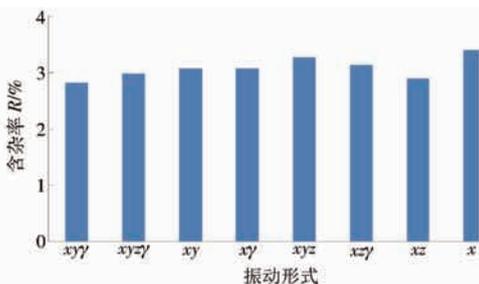


图10 各振动形式的含杂率比较

Fig.10 Comparisons of trash content

4.3 透筛试验分析

从图9中可发现,在各种振动形式下,振动筛的

(3) 振动筛模型

建立的振动筛三维模型如图8所示。由于研究的重点在于多维并联振动筛面上物料的运动规律和透筛过程,同时为节省仿真时间,筛面尺寸设计较小,其几何及振动参数如表6所示。在同一初始条

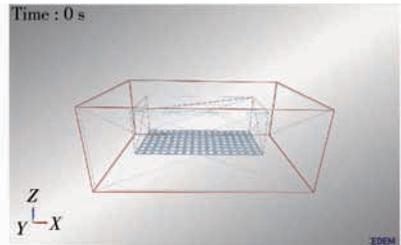


图8 振动筛三维模型

Fig.8 Vibrating screen model

筛分效率从高到低排序为:xyγ > xyγz > xy > xγ > xyz > xzy > xz > x,其中,出现了xyγ > xyγz,xy > xyz,xγ > xyz的情况,这是由于振动筛面的物料堆积较薄所造成的^[11]。而当筛面物料堆积较厚时,籽粒跳跃需要较大的Z方向激振力,此时上述情况转变为:xyγz > xyγ,xyz > xy,xyz > xγ。因此,在实际筛分中,需同时考虑振动筛的筛分效率和生产率的前提下,优先选用xyzγ 3 平移 1 转动四维振动形式,作为理想的筛面多维运动形式。另外,从图10中可看出,各振动形式下筛下物含杂率不高且比较接近。

5 样机研制与试验

5.1 机构构型设计

基于上述优选的理想筛面运动形式,根据基于方位特征集(POC)^[31]的并联机构拓扑结构设计方法,设计了一种3T-1R并联机构^[32-33],该机构的特点是:①4条支链结构相同,具有较好的对称性,刚度好。②均由转动副组成,加工制造、维修容易。拓扑结构为4-SOC{-R//R//R⊥R//R-},其中,R₁₁⊥R₂₁,R₃₁⊥R₄₁,其机构简图如图11所示。

(1) 机构组成

如图11所示,该机构由静平台0、动平台1及4条结构相同的RRR-RR型支链组成,每条支链(SOC_i)的方位特征(POC)集为M_{b_i} = [t³/_{r²}] (i=1,2,3,4)。因此,机构的POC集为M_{pa} = [t³/_{r²}] ∩ [t³/_{r²}] ∩

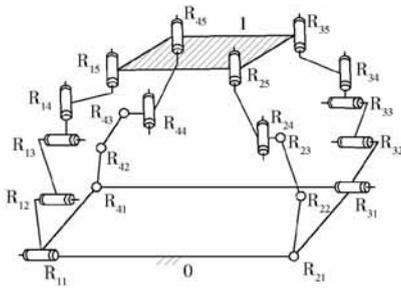


图 11 3T-1R 机型机构简图

Fig. 11 Schematic diagram of 3T-1R mechanism

$$\begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^1 \end{bmatrix}, \text{动平台输出运动为 3 平移 1 转动。}$$

(2) 自由度计算

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^3 \xi_{L_j} = 20 - (6 + 5 + 5) = 4$$

机构的自由度 (DOF) 为 4。

由此可见,该机构可实现上述研究得出的理想筛面运动形式——3 平移 1 转动,即 x 、 y 、 z 和 γ 的运动输出,且结构对称,便于加工制造。

5.2 机构运动仿真及样机研制

(1) 三维建模及运动仿真

应用 Solidworks 对多维并联振动筛主机构进行装配建模,其中,筛面尺寸为 $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,每条支链从静平台到动平台的杆长参数依次为: $l_1 = 20 \text{ mm}$, $l_2 = 200 \text{ mm}$, $l_3 = 100 \text{ mm}$, $l_4 = 100 \text{ mm}$ 。设置电动机转速为 100 r/min ,运动模拟时间 1 s 。得到的动平台位移与姿态变化曲线如图 12 所示。

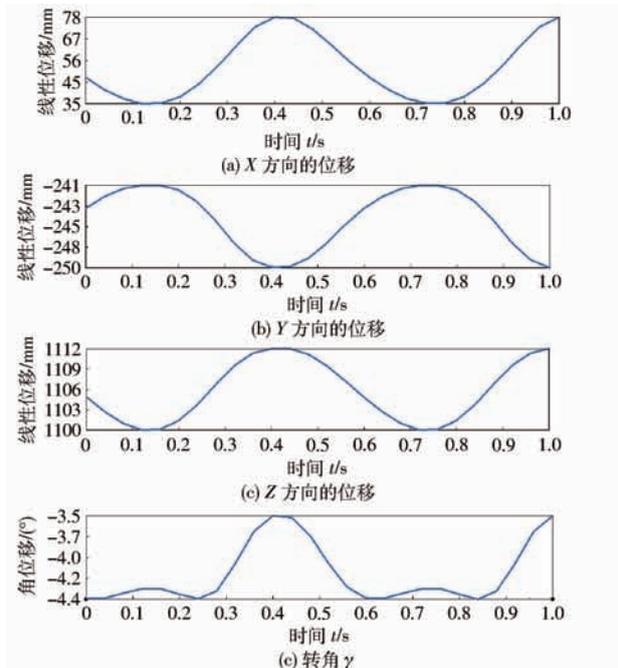


图 12 3T-1R 运动输出曲线

Fig. 12 3T-1R motion curves

(2) 样机研制

根据上述设计结果,研制的 3T-1R 并联振动

筛样机(型号: CUS I)如图 13 所示。



图 13 3T-1R 并联振动筛样机

Fig. 13 3T-1R vibrating screen prototype

5.3 试验验证

为验证模拟的正确性,在自行研制的 3T-1R 并联振动筛样机上,对谷物颗粒的筛分效率进行试验验证。

筛网尺寸为 $600 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,孔径为 8 mm ;振动频率为 1.67 Hz 。根据样机实际尺寸,设置模拟振动筛面物理参数,筛面和稻谷籽粒具体材料参数见表 4、5。物料下降速度为:稻谷籽粒每秒 6000 粒,稻谷千粒质量为 30 g ,即 180 g/s 。按照图 12 中振动参数进行谷物筛分的仿真试验,试验时间 5 s ,重复试验 2 次,筛分结果如图 14 所示。

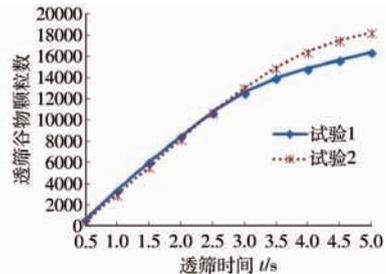


图 14 仿真筛分试验结果

Fig. 14 Simulation screen result

然后,在振动筛样机上进行谷物实际筛分试验。入料速度为:稻谷籽粒 180 g/s ,试验时间 5 s ,重复试验 3 次,筛分结果如表 7 所示。

表 7 仿真试验和样机试验的透筛率比较

Tab. 7 Comparison of simulation screening test and prototype screening experiment

试验序号	5 s 透筛谷物 颗粒/颗	5 s 透筛谷物 质量/g	5 s 平均透筛率 $p/(g \cdot s^{-1})$
仿真 1	18263	548	103.9
仿真 2	16377	491	
样机 1		506	94.9
样机 2		449	
样机 3		469	

为更好地比较仿真试验和样机试验的筛分结果,计算各自的透筛率,如表 7 所示。由表 7 可发现,样机试验结果与 EDEM 模拟结果基本一致,说明利用 EDEM 软件建立振动筛的筛分模型,并对其进行筛分模拟是可行的。

6 结论

(1) 利用 EDEM 仿真软件,研究了 6 个单自由度振动形式下筛面物料的分散和分层过程,通过引入分散度和分层速率评价指标,得出筛面物料在各单自由度振动下的分散度和分层速率的排序结果分别为 $x > y > z > \beta > \alpha > \gamma$ 和 $x > y > \gamma > z > \beta > \alpha$; 且 x 和 y 单自由度振动下的分散度和分层速率,分别明显高于其它 4 个振动自由度的分散度和分层速率。同时发现当筛面物料具有一定厚度时,振动自由度 γ 的效果就显现出来。

(2) 根据分散和分层的试验结果,选取 x, y, z, γ

4 个振动自由度进行理想筛面运动形式的优选。对各种振动形式下筛面物料的透筛过程进行筛分模拟研究,根据筛分效率和筛下物含杂率评价指标,优选出筛分性能最好的 3 平移 1 转动四维振动形式 $xyzy$, 作为理想的筛面运动形式。

(3) 根据优选的理想筛面运动形式,考虑振动筛结构的对称性,设计了一种 3T-1R 并联机构,并研制了样机。

(4) 为验证模拟的正确性,在自行研制的 3T-1R 并联振动筛样机上进行谷物筛分试验。试验结果与 EDEM 模拟结果基本一致。

参 考 文 献

- 贾晶霞, 刘俊峰, 杨欣, 等. 振动筛筛分性能的影响因素及分析[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(1): 86-89.
JIA Jingxia, LIU Junfeng, YANG Xin, et al. The analysis on the influence factors of vibrating sieve property [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2003, 26(1): 86-89. (in Chinese)
- 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)
- LIU Keshun. Some factors affecting sieving performance and efficiency[J]. Powder Technology, 2009, 193(2): 208-213.
- 沈惠平, 杨廷力. 用于并联运动装备的二自由度空间并联机构: 中国, ZL200610088126.4[P]. 2006-11-29.
- 沈惠平, 张会芳. 一种新型并联筛及其运动学研究及研制[J]. 机械设计, 2007, 24(6): 34-36.
SHEN Huiping, ZHANG Huifang. A kind of novel parallel movement vibration sieve and its kinematic research and development [J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(6): 34-36. (in Chinese)
- 沈惠平, 张会芳. 并联筛的筛分运动规律及其轨迹的研究[J]. 机械设计, 2008, 25(12): 20-23.
SHEN Huiping, ZHANG Huifang. Research on a law of screening movement of parallel moving vibration sieve and its track [J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(12): 20-23. (in Chinese)
- 沈惠平, 张江涛. 新型并联筛的筛分效率及其试验研究[J]. 机械设计, 2011, 28(2): 83-86.
SHEN Huiping, ZHANG Jiangtao. Sifter efficiency and experimental study on a new type of vibrating sifter based on PKM [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(2): 83-86. (in Chinese)
- 沈惠平, 王新翔, 邓嘉鸣. 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. 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)
- 马履中, 林钰珍, 杨文亮, 等. 基于籽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 Lvzhong, 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)
- 林钰珍. 基于并联机构的高效多维振动筛设计与研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
LIN Yuzhen. Research and design of efficient Multi-dimensional vibrating screen based on parallel mechanism [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- 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 vibrating [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- 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]. 农业机械学报, 2015, 31(6): 49-55.
WANG Chengjun, LIU Qiong, MA Lvzhong, et al. Cottonseed particle motion law in 3-DOF hybrid vibration screen surface [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 31(6): 49-55. (in Chinese)
- 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.
- 沈有柏. 颗粒物料在三自由度风筛式清选装置虚拟样机中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
SHEN Youbo. Research on the motion of grain in 3-DOF air-and-screen cleaning device virtual prototype [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)
- 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- LI J, WEBB C, PANDIELLA S S, et al. Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation [J]. Powder Technology, 2003, 133(1-3): 190-202.

- 17 CLEARY P W. Recent advance in DEM modeling of tumbling mills[J]. Minerals Engineering,2001,14(10):1295-1319.
- 18 TATEMOTO Y, MAWATARI Y, YASUKAWA T, et al. Numerical simulation of particle motion in vibrated fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science,2004,59(2):437-447.
- 19 TIJSKENS E, RAMON H, BAERDEMAKER J D. Discrete element modeling for process simulation in agriculture[J]. Journal of Sound and Vibration,2003,266(3):493-514.
- 20 MISHRA B K. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method:Part I - contact mechanics [J]. International Journal of Mineral Processing,2003,71(1-4):73-93.
- 21 GODA T J, EBERT F. Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos[J]. Powder Technology,2005,158(1-3):58-68.
- 22 CLEARY P W, SAWLEY M L. DEM modeling of industrial granular flows:3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge[J]. Applied Mathematical Modelling,2002,26(2):89-111.
- 23 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 Yuemin,ZHANG Shuguang,JIAO Hongguang,et al. Simulation of discrete element of particles motion on the vibration plane[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2006,35(5):586-590. (in Chinese)
- 24 焦红光,赵跃民. 用颗粒离散元法模拟筛分过程[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(2):232-236.
JIAO Hongguang,ZHAO Yuemin. Screen simulation using a particle discrete element method[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2007,36(2):232-236. (in Chinese)
- 25 李洪昌. 风筛式清选装置理论及试验研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
LI Hongchang. Theoretical and experimental study on air-and-screen cleaning unit [D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2011. (in Chinese)
- 26 王桂锋,童昕,陈艳华,等. 基于 DEM 的振动筛筛分参数对筛分效率影响的研究[J]. 矿山机械,2010(15):102-106.
WANG Guifeng,TONG Xin,CHEN Yanhua,et al. Study on influence of sieving parameters of vibration screen on sieving efficiency based on DEM[J]. Mining & Processing Equipment,2010(15):102-106. (in Chinese)
- 27 赵啦啦,刘初升,闫俊霞,等. 颗粒筛分过程的三维离散元法模拟[J]. 煤炭学报,2010,35(2):307-311.
ZHAO Lala,LIU Chusheng,YAN Junxia,et al. Numerical simulation of particle screening process based on 3D discrete element method[J]. Journal of China Coal Society,2010,35(2):307-311. (in Chinese)
- 28 李菊,赵德安,沈惠平,等. 基于 DEM 的谷物三维并联振动筛筛分效果研究[J]. 中国机械工程,2013,24(8):1018-1022.
LI Ju,ZHAO Dean,SHEN Huiping,et al. Research on screening effect of grain three dimensional parallel vibrating screen based on DEM[J]. China Mechanical Engineering,2013,24(8):1018-1022. (in Chinese)
- 29 焦红光. 振动筛分过程解析[M]. 北京:煤炭工业出版社,2007.
- 30 赵啦啦. 振动筛分过程的三维离散元法模拟研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2013.
ZHAO Lala. Simulation study on vibration screening process using 3D discrete element method[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2013. (in Chinese)
- 31 杨廷力,刘安心,罗玉峰,等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京:科学出版社,2012.
- 32 沈惠平,杨廷力,朱小蓉,等. 一种三平移一转动并联机器人:中国,201510564382.5[P]. 2015-09-08.
- 33 沈惠平,杨廷力,李菊,等. 一种三平移一转动并联机器人装置:中国,201510567133.1[P]. 2015-09-08.