

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.05.006

三平移一转动四维并联振动筛主机构优选

李 菊,曾氢菲,沈惠平,邓嘉鸣,强恒存,吴 晓

(常州大学 现代机构学研究中心,江苏 常州 213164)

摘要:为得到理想的三平移一转动四维并联振动筛主机构型,首先运用 EDEM 软件,分析得到三平移一转动筛面理想的运动输出:沿筛面长度、宽度和高度方向的移动幅值分别为 15,15,6 mm,绕筛面法线方向的转动幅值为 6° ;然后选择具有 3 种不同支链布置方式的并联机构 $SOC\{-R//R//R\perp R//R-\}\oplus SOC\{-R//R\perp R//R-\}\oplus 2-SOC\{-S-S-\}$ 作为四维振动筛主机构,并得到该机构在 3 种不同支链布置方式下的运动输出幅值;再根据理想的筛面运动输出幅值与振动筛主机构在 3 种不同支链布置方式下的筛面运动输出幅值,应用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 优选出理想的四维并联振动筛主机构型;接着运用 EDEM 软件对四维并联振动筛在 3 种不同支链布置方式下的物料筛分过程进行了仿真试验验证;最后研制了四维并联振动筛样机,并在样机上进行了筛分试验验证。本研究为四维并联振动筛的设计和应用提供参考依据。

关键词:并联振动筛;EDEM;机构优选;AHP;支链布置

中图分类号:TH 237.6

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)05-0042-09

Mechanism Optimization of 4-Dimensional Parallel Vibrating Screen with Three Translations and One Rotation

LI Ju, ZENG Qingfei, SHEN Huiping, DENG Jiaming, QIANG Hengcun, WU Xiao

(Research Center for Advanced Mechanism Theory, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: In order to obtain the optimal configuration of the four degree of freedom parallel mechanism, the output motion of three translational and one rotational mechanism is analyzed based on EDEM software, and the ideal motion parameters of the screen surface are obtained: the amplitude of x, y, z are respectively 15, 15, 6 mm, and the amplitude of γ is 6 degrees; There are three branched different layouts of the main mechanism of parallel vibrating screen, which can be expressed as $SOC\{-R//R//R\perp R//R-\}\oplus SOC\{-R//R\perp R//R-\}\oplus 2-SOC\{-S-S-\}$, the simulation results of the screen surface which are close to the ideal screen surface form are obtained. Then, according to

收稿日期:2018-02-17。

基金项目:国家自然科学基金项目(51405039,51375062)。

作者简介:李菊(1981—),女,江苏无锡人,博士,讲师。E-mail: wangjuo209@163.com

引用本文:李菊,曾氢菲,沈惠平,等. 三平移一转动四维并联振动筛主机构优选[J].常州大学学报(自然科学版), 2018,30(5): 42-50.

the ideal output motion of the screen surface and the simulation results of the screen surface with three kinds of arrangement modes, the analytic hierarchy process (AHP) is applied to the optimization selection of 4-DOF parallel vibration sieve. Evaluation and the rank of screening efficiency of three kinds of main mechanism are obtained, and the simulation of parallel vibration screening process is verified, finally the prototype is produced. The research of this paper could provide reference for the design and application of 4-dimensional parallel vibrating screen.

Key words: parallel vibrating screen; EDEM; mechanism optimization; AHP; branch layout

随着粉体颗粒技术、机构设计等相关领域的发展,众多新技术,新思想被引入到筛分技术中来。为克服传统振动筛的缺点,沈惠平教授在2006年于国内外最早提出并联振动筛的概念^[1],创新设计并研制出结构和工作原理新颖的三维并联振动筛,通过对多维振动筛面上颗粒群的宏观运动过程、筛面运动轨迹和筛分实验的研究,验证了多维并联振动筛具有良好的筛分效果^[2-4],解决了传统振动筛的运动轨迹单一、结构复杂、占地空间大、筛分效率低等缺点。因此,并联振动筛得到了越来越来广泛而深入的研究。

林钰珍^[5]在对现有往复式振动筛面上籽粒的非线性跳动进行理论分析的基础上,利用LS-DYNA软件研究了平面往复式和几种新型多维运动筛面上籽粒的运动情况,得到一平移两转动新型多维筛面运动形式。杨晓彬^[6]提出基于三自由度三平移并联机构的筛分装置,给出筛面的运动方程,建立了颗粒物料与筛面、颗粒物料间的数学碰撞模型。谢俊^[7]选择了1种全解耦三平移并联机构作为茶叶筛分机主体机构,并进行了试验验证研究。王南等^[8]针对茶叶筛分实际作业需要,建立三维转动茶叶筛分机构运动学模型,进行了工作空间、灵巧性及奇异位形等运动性能研究。王成军^[9]提出了1种3T-1R并联振动筛分试验台,并对物料在三维并联振动筛上的运动规律进行了研究。李菊等^[10]优选了透筛性能最好的三平移一转动四维振动形式作为理想的筛面运动形式,并设计了1种3T-1R并联振动筛主机构。为进一步完善3T-1R并联振动筛主机构型,需要对振动筛主机构在各种不同支链布置方式下的筛分效率进行分析、研究,以优选得到理想的3T-1R并联振动筛主机构型。

近年来离散单元法(DEM)^[11]在筛分领域得到了推广应用。采用离散单元法可有效模拟和分析不同振动形式和振动参数下的物料筛分过程^[12-14],且试验成本低。本文运用离散元工程应用软件EDEM对四维运动筛面的物料筛分过程进行模拟,获得三平移一转动筛面的理想运动输出幅值,研究振动筛主机构在3种不同支链布置方式下的筛面运动输出幅值,以优选出理想的四维并联振动筛主机构型并进行试验验证。本研究对四维并联振动筛的机构设计优选和筛分应用研究具有参考意义。

1 多维振动筛面理想运动幅值的研究

多维振动筛面理想运动幅值是指在筛面理想振动形式确定后,研究各振动自由度幅值为多大时,筛面的透筛效率最高。文献[10]优选出分散度和分层速率较优的4个单自由度振动,即沿筛面长度、宽度和高度方向的移动自由度 x, y, z ,以及绕筛面法线方向的转动自由度 γ 。本文在优选振动自由度组成的振动形式三平移一转动的基础上,运用离散元软件EDEM,采用正交试验的方法,研究三平移一转动筛面的理想运动输出。正交试验设计方法(Orthogonal experiment design)是根据正交性,选择部分具有代表性的试验组合进行仿真,有效地分析出透筛效率高的筛面振幅组合,避免了穷举法中过多的试验次数。

采用稻谷籽粒和短茎秆作为透筛实验的筛分对象,进行多维振动筛面理想运动幅值的研究。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1所示;短茎秆设计为圆柱形,

长 22 mm,半径 3 mm,模型如图 2 所示;建立的振动筛三维模型如图 3 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。试验中稻谷籽粒每秒入料12 000颗,短茎秆每秒入料 640 根。物料及筛面材料的物理特性及其材料的接触参数,见表 1、表 2。

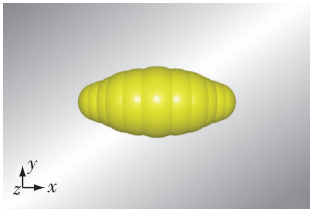


图 1 籽粒模型

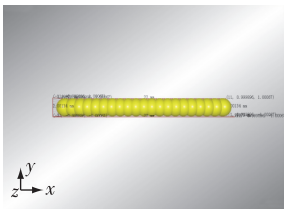


图 2 短茎秆模型图

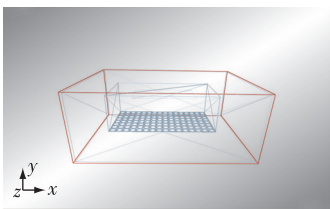


图 3 振动筛三维模型

表 1 材料物理参数

材料名称	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)	泊松比	剪切模量/MPa
籽粒	1 380	0.3	2.6
短茎秆	100	0.4	1
筛面(刚)	7 800	0.3	700

表 2 材料接触参数

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

在用 EDEM 软件分析颗粒在筛面的透筛率时,设置正交试验的 4 个因素为振动自由度 x,y,z 的移动幅值,振动自由度 γ 的转动幅值,4 个因素的水平均为 5 个,其中,3 个振动自由度 x,y,z 移动幅值的水平分别为 3,6,9,12,15 mm, γ 振动自由度的 5 个水平为 $3^\circ,6^\circ,9^\circ,12^\circ,15^\circ$ 。根据正交性,将 4 个因素的水平组合,得到每一次的试验条件,进行透筛仿真试验,得到的筛分结果,即透筛颗粒数见表 3。对试验结果进行分析,得到正交试验组的指标结果见表 4。

表 3 透筛试验

试验序号	因素水平				响应值
	x 移动幅值/mm	y 移动幅值/mm	z 移动幅值/mm	γ 转动幅值/($^\circ$)	透筛颗粒数
1	3	3	3	3	5 685
2	3	6	6	6	7 501
3	3	9	9	9	7 253
4	3	12	12	12	6 622
5	3	15	15	15	6 228
6	6	3	6	9	7 727
7	6	6	9	12	7 035
8	6	9	12	15	6 458
9	6	12	15	3	6 564
10	6	15	3	6	8 323
11	9	3	9	15	6 982
12	9	6	12	3	7 250
13	9	9	15	6	6 814
14	9	12	3	9	7 915
15	9	15	6	12	6 926
16	12	3	12	6	7 758
17	12	6	15	9	7 199
18	12	9	3	12	7 354
19	12	12	6	15	6 571

续表

试验序号	因素水平				响应值
	x 移动幅值/mm	y 移动幅值/mm	z 移动幅值/mm	γ 转动幅值/(°)	透筛颗粒数
20	12	15	9	3	8 461
21	15	3	15	12	6 885
22	15	6	3	15	6 900
23	15	9	6	3	9 125
24	15	12	9	6	8 025
25	15	15	12	9	7 093

表4 指标分析

指标	振动自由度 x	振动自由度 y	振动自由度 z	振动自由度 γ
κ_1	6 657.8	7 007.4	7 235.4	7 417.0
κ_2	7 221.4	7 177.0	7 570.0	7 684.2
κ_3	7 177.4	7 400.8	7 551.2	7 437.4
κ_4	7 468.6	7 139.4	7 036.2	6 964.4
κ_5	7 605.6	7 406.2	6 738.0	6 627.8
R'	5 947.8	5 398.8	5 832.0	6 056.4

表4中, $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5$ 分别为5种水平下数据的综合平均,表示5种水平综合平均意义下的透筛量; R' 为极差,极差大小反映了各个振动自由度对振动筛透筛量的影响程度。由表4中 R' ,得到4个方位变量对透筛量影响程度的顺序为: $\gamma > x > z > y$ 。振动自由度 x, y, z, γ 下指标最大值分别是7 605.6, 7 406.2, 7 570.0, 7 684.2,所以,使得透筛率最高的最优组合方案是:振动自由度 x, y, z, γ 的运动幅值分别为15, 15, 6 mm, 6°。多维运动筛面的理想运动幅值可作为振动筛主机构结构设计的依据,并为基于层次分析法(AHP)优选振动筛主机构提供评价标准。

2 四维并联振动筛主机构分析

2.1 振动筛主机构拓扑结构设计

文献[10]设计了1种3T-1R并联机构作为四维振动筛主机构,其拓扑结构为4-SOC $\{-R//R//R \perp R//R-\}$ 。为简化机构,本文将其中2条5R支链替换为SSR支链。在此基础上,为进一步优化改进机构,根据少输入-多输出的并联机构的拓扑设计方法^[15],用简化的等效结构部分代替机构中的支链组合,即采用无约束SS支链代替SSR支链,并采用4R支链代替其中1条5R支链,逐步刚化机构的驱动副,使机构的自由度逐渐减小为1,但机构的输出方位特征集保持不变,从而得到满足理想筛面运动形式和筛分规律的一自由度四维并联振动筛主机构,由1条SOC $\{-R_{11}/R_{12}/R_{13} \perp R_{14}/R_{15}-\}$,1条SOC $\{-R_{31}/R_{32} \perp R_{33}/R_{34}-\}$ 以及2条无约束SOC $\{-R_{i1}-R_{i2}\} (i=2,4)$ 支链组成,其中,机构的驱动副分别为 R_{11} 副。该类型机构有2种不同的支链布置形式,如图4(a),4(b)所示。

其中, R_{11}, R_{12}, R_{13} 两两互相平行, R_{14}, R_{15} 两两互相平行, R_{13}, R_{14} 两两互相垂直; R_{31}, R_{32} 两两互相平行, R_{33}, R_{34} 两两互相平行, R_{32}, R_{33} 两两互相垂直,且 R_{11}, R_{31} 互相垂直;对于两条无约束SS支链,球副可任意布置。显然,I型机构和II型机构的拓扑特征相同,基于并联机构结构设计方法及理论^[16],得并联振动筛主机构动平台的POC集为

$$M_{pa} = \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^2(\parallel \diamond(R_{13}, R_{14})) \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^2(\parallel \diamond(R_{33}, R_{34})) \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^3 \end{matrix} \right] \cap \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^3 \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} t^3 \\ r^1(\parallel R_{14}) \end{matrix} \right]$$

动平台输出运动仍为三平移一转动,但其中只有 1 个为独立运动。机构的自由度为

$$F = \sum_{i=1}^m f_i - \sum_{j=1}^3 \xi_{L_j} = 19 - (6 + 6 + 6) = 1$$

因此,一自由度四维并联振动筛主机机构利用 1 个驱动输入使其动平台产生四维运动输出,减少了驱动副和构件数目,加工制造和维修更容易。

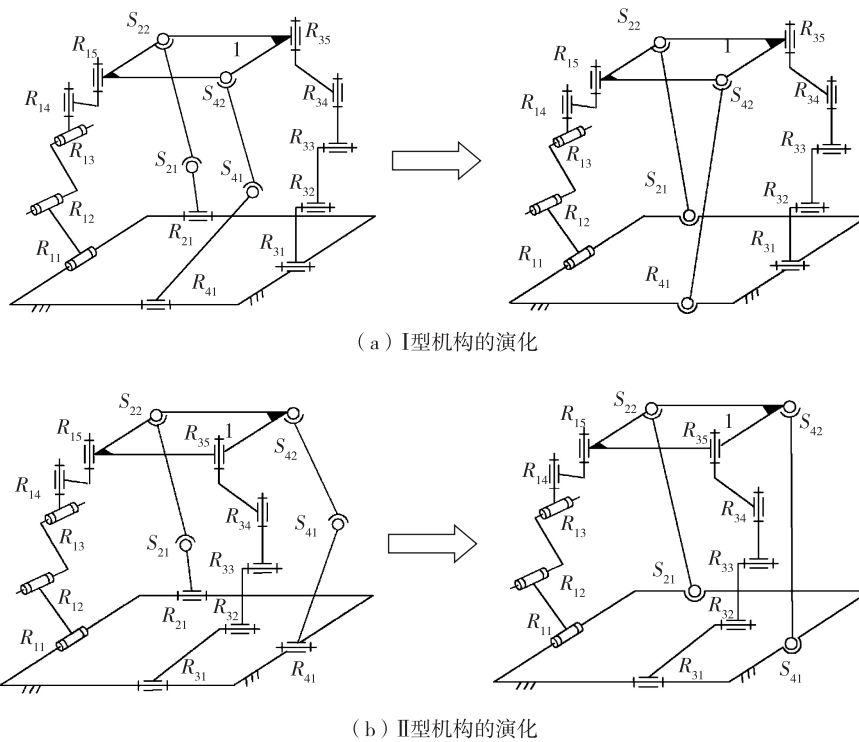


图 4 并联振动筛主机机构

设动平台筛面为长方形,则 2 条支链 SS 既可布置于矩形短边(记为 II- α 型),亦可布置于矩形长边(记为 II- β 型),其拓扑结构组成仍与 I 型相同,但由于支链布置方位改变,导致筛面的运动幅值改变,影响振动筛筛分效率,所以 II- β 型作为并联振动筛主机机构优选的第 3 种方案。

2.2 机构运动仿真及分析

运用 Solidworks 软件,对 3 种四维并联振动筛进行运动学仿真。设置 4 条支链的结构参数:第 1 条支链 $SOC_1 \{-R_{11} // R_{12} // R_{13} \perp R_{14} // R_{15} -\}$ 中, R_{11} 与 R_{12} 之间的曲柄长度为 20 mm, R_{12} 与 R_{13} 之间的杆长为 200 mm, R_{13} 与 R_{14} 之间是 2 条直角边长为 100 mm 的三角架, R_{14} 与 R_{15} 之间的杆长为 100 mm;第 3 条支链 $SOC_3 \{-R_{31} // R_{32} \perp R_{33} // R_{34} -\}$ 中, R_{31} 与 R_{32} 之间的杆长为 200 mm, R_{32} 与 R_{33} 之间是 2 条直角边长为 100 mm 的三角架, R_{33} 与 R_{34} 之间的杆长为 100 mm;第 2、第 4 两条 SS 支链的杆长均为 250 mm。因 II- α 型并联振动筛将 2 条支链 SS 布置于矩形短边, II- β 型并联振动筛将两条支链 SS 布置于矩形长边,对 4 条支链进行不同的布置,得到 I 型, II- α 型, II- β 型并联振动筛的三维模型,如图 5 所示。

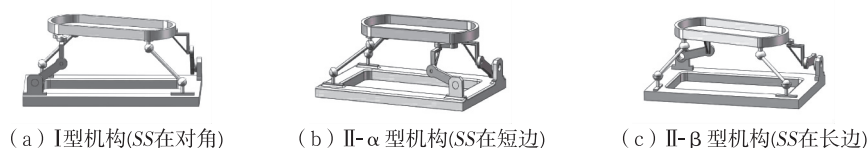


图 5 机构的 Solidworks 模型

对 I 型, II- α 型, II- β 型并联振动筛的运动副以及构件添加约束关系,设置电机转速为 100 r/min,运动模拟时间为 2s,分别得到筛面的四维运动输出曲线,其具体运动输出幅值见表 5。

表 5 筛面运动幅值

布置方案	x 的移动幅值/mm	y 的移动幅值/mm	z 的移动幅值/mm	γ 的转动幅值/(°)
I 型	1.3	26.0	21.0	3.5
II- α 型	12.0	6.0	14.5	5.5
II- β 型	3.0	11.0	2.5	3.0

由表 5 可知,在相同尺度参数条件下, I 型并联振动筛沿筛面长度方向的移动幅值较小,其余振动自由度的运动幅值均较大, II- α 型并联振动筛沿筛面宽度方向的移动幅值较小,其余振动自由度的运动幅值均较大; II- β 型并联振动筛沿筛面长度和宽度方向的移动幅值均较小。

为客观的评价振动筛各构型方案的优劣,必须将多种因素、指标综合起来进行分析。本文依据灰色系统理论,应用层次分析法分析相同拓扑结构下最大化筛分效率的主机构类型。

3 并联振动筛主机机构 3 种构型的评价

3.1 层次结构模型的建立

具有理想筛面输出的并联振动筛具有较高的筛分效率,3 种方案中最接近理想筛面运动输出的主机机构即有最高的筛分效率。首先,建立层次结构模型,模型由目标层、准则层及方案层 3 个层次组成^[17-19]。目标层描述了最终的目的,即找到 3 种方案中最接近理想筛面运动输出的主机机构;准则层交待了要考虑的因素,本文从 4 个因素出发,评价 3 种构型的运动仿真输出与四维运动筛面的理想运动幅值的接近程度;方案层即四维并联振动筛主机机构的 3 种构型。

为此,建立层次结构模型如图 6 所示。

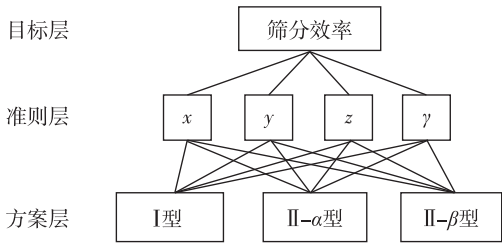


图 6 层次结构模型

表 7 方案层判断矩阵

(a) x 的判断矩阵

	I	II- α	II- β
I	1	3/7	3/4
II- α	7/3	1	7/4
II- β	4/3	4/7	1

(b) y 的判断矩阵

	I	II- α	II- β
I	1	8/5	8/7
II- α	5/8	1	5/7
II- β	7/8	1.4	1

(c) z 的判断矩阵

	I	II- α	II- β
I	1	0.4	2/7
II- α	2.5	1	5/7
II- β	3.5	1.4	1

(d) γ 的判断矩阵

	I	II- α	II- β
I	1	7/8	1
II- α	8/7	1	8/7
II- β	1	7/5	1

3.2 构造各层次判断矩阵

根据理想的筛面运动输出与 3 种方案的筛面运动仿真输出,构造各层次判断矩阵见表 6、表 7。

表 6 准则层判断矩阵

	x	y	y	γ
x	1	8	4/3	8/9
y	1/8	1	1/6	1/9
z	3/4	6	1	2/3
γ	9/8	9	3/2	1

3.3 判断矩阵的一致性检验

以上 x, y, z, γ 4 个振动自由度的判断矩阵的构造能减少其他因素的干扰,较客观地反映出一对因子影响力的差别。但综合全部比较结果时,为了避免其包含非一致性,还要对构造的判断矩阵进行一致性检验^[19]。根据一致性指标 C_R 来决定是否能接受它。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (1)$$

式中: $C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$; λ_{\max} 表示判断矩阵的最大特征值; n 表示因子的个数。

R_1 的值是用随机方法构造 500 个样本矩阵,随机地从 1~9 及其倒数中抽取数字构造正互反矩阵,求得最大特征根的平均值 λ'_{\max} ,得到 R_1 。根据文献[20]列出的 R_1 表,查找得到相应的 R_1 值,如表 8 所示。

表 8 R_1 的值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_1	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

经计算,各判断矩阵一致性比例如下: 准则层一致性比例为 $C_{R0} = 0$; 方案层一致性比例为 $C_{Rx} = 3.83 \times 10^{-16}$, $C_{Ry} = 3.8 \times 10^{-16}$, $C_{Rz} = 3.8 \times 10^{-16}$, $C_{R\gamma} = 0$, 均远小于 0.10, 表明判断矩阵的一致性可以接受。

3.4 层次总排序及一致性检验

以上得到了一组元素对其上一层元素的权重。计算得到准则层中 x, y, z, γ 4 个振动自由度的权值分别为: 0.333 3, 0.041 7, 0.250 0, 0.375 0。

现需要计算最低层中各机型方案对于筛分效率的排序权重,从而进行机型的选择。计算结果见表 9。

根据 I, II- α , II- β 层次权值总排序权值分别为 0.243 1, 0.402 7, 0.354 1, 最为理想的方案为

II- α 型并联振动筛。对层次总排序也需作一致性检验,虽各层次已经过层次单排序的一致性检验,但在综合考察时,各层次的非一致性仍有可能累积,引起最终分析结果较严重的非一致性。根据表 9,总排序一致性比例为 $C_R = 1.60 \times 10^{-17}$, 表明层次总排序结果具有较满意的一致性,并接受最为理想的模型为 II- α 型并联振动筛这一分析结果。

表 9 层次总排序

准则	x	y	z	γ
准则层权值	0.333 3	0.041 7	0.250 0	0.375 0
I 单层排序权值	0.214 3	0.400 0	0.142 9	0.318 2
II- α 单层排序权值	0.500 0	0.250 0	0.357 1	0.363 6
II- β 单层排序权值	0.285 7	0.350 0	0.500 0	0.318 2

4 筛分仿真试验和样机试验验证

4.1 筛分仿真试验

以稻谷籽粒和秸秆混合物为筛分对象,筛面和稻谷籽粒等具体材料参数见表 1、表 2,筛面尺寸的长×宽为 600 mm×300 mm,筛孔直径为 10 mm,颗粒工厂产生稻谷速率为每秒 5 000 粒,稻谷千粒质量为 30 g,即每秒 150 g;产生秸秆速率为每秒 260 根。根据上述 3 种构型的运动仿真输出,其具体运动输出

幅值见表5,振动频率取1.67 Hz,在 EDEM 离散元软件中进行透筛仿真试验,仿真时间5 s,筛分结果如图7所示。

由图7可发现,从0.9 s开始,3种构型的筛分结果开始区别明显,其中Ⅱ- α 型并联振动筛筛分效率最高。Ⅱ- α 型并联振动筛相较于Ⅰ型、Ⅱ- β 型并联振动筛, x, y 振动自由度的移动幅值较大,从而说明增加 x, y 振动自由度的移动幅值有利于提高透筛率。EDEM 模拟结果与上述层次分析法分析结果一致,说明应用层次分析法对机型的优选是可行的。当机构类型较多,具有一定复杂性时,可以采用层次分析法对机型进行有效地优选。

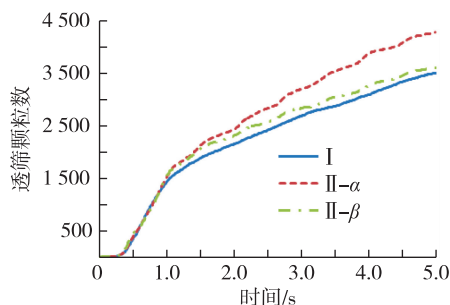


图7 试验结果

4.2 样机试验验证

根据上述优选结果,研制的Ⅱ- α 型3T-1R并联振动筛样机(CUSⅡ型号并联振动筛)如图8所示,电机型号为YS-W6324,减速器型号为WD2.5。

为验证模拟的正确性,在CUSⅡ型号并联振动筛样机上,对谷物颗粒的筛分效率进行试验验证。筛网尺寸和振动频率等参照上述仿真试验条件,入料速度为:稻谷籽粒每秒150 g,试验时间5 s,重复试验3次,筛分结果见表10。

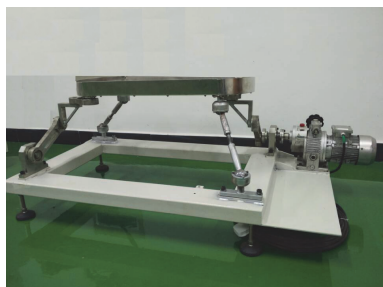


图8 3T-1R 振动筛样机

表10 谷物透筛的仿真试验和样机试验透筛率比较

试验组	质量/g	平均透筛率/(g · s ⁻¹)
仿真	128	25.6
样机1	149	
样机2	140	28.2
样机3	134	

由表10可发现,样机试验结果与 EDEM 模拟结果基本一致,从而验证了振动筛筛分模拟的可行性。

5 结 论

本研究完善了并联振动筛的构型优选,为四维并联振动筛的设计和应用提供了参考依据。

1)运用 EDEM 仿真软件,模拟四维运动筛面的物料筛分过程,得出三平移一转动筛面的理想运动输出幅值为:沿筛面长度、宽度和高度方向的移动幅值分别为15,15,6 mm,绕筛面法线方向的转动幅值为6°。

2)选择具有3种不同支链布置方式的并联机构 $SOC\{-R // R // R \perp R // R-\} \oplus SOC\{-R // R \perp R // R-\} \oplus 2-SOC\{-S-S-\}$ 作为四维振动筛主机构,并仿真得到该机构在3种不同支链布置方式下的运动输出幅值。

3)应用层次分析法,分析四维并联振动筛主机构在3种不同支链布置方式下的筛面运动输出幅值

与理想筛面运动输出的接近程度,从而优选出四维并联振动筛主机机构构型的最佳方案,并研制了样机。

4)为验证应用层次分析法优选机型的可行性,对四维并联振动筛在3种不同支链布置方式下的筛分效率进行了仿真试验,试验结果与层次分析法分析结果一致。

5)为验证模拟的正确性,在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:

- [1]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:1868689A [P].2006-11-29.
- [2]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.
- [3]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):20-23.
- [4]SHEN H P, XUE C Y, ZHANG J T, et al. A novel PKM-based vibrating sifter and its screening efficiency experimental study[C]//13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato:[s.n.],2011:19-25.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]谢俊,张晓庆,王成军.基于三平移并联机构的茶叶筛分试验[J].农业机械学报,2012,43(10):101-104.
- [8]王南,周海栋,崔国华,等.基于三转动并联机构的茶叶筛分装置运动学性能研究[J].工程设计学报,2014,21(3):266-272.
- [9]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.
- [10]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.
- [11]胡国明.颗粒系统的离散元素法分析仿真-离散元素法的工业应用与 EDEM 软件简介[M].武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- [12]LUN T K, CHANG T H, LIN Y, et al. DEM simulation of a 3D vertical vibratory screening process: the study of a simulated woven-mesh structure[J]. Aiche Journal, 2011, 57(4): 918-928.
- [13]CHEN Y H, TONG X. Model screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20: 615-620.
- [14]RAHMAN M, SHINOHARA K, ZHU H P, et al. Size segregation mechanism of binary particle mixture in forming a conical pile[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(23): 6089-6098.
- [15]沈惠平,邓嘉鸣,李菊,等.少维输入-多维期望运动输出并联机构及其应用[J].机械设计与制造工程,2013,42(6):1-4.
- [16]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.
- [17]SAHOO S, DHAR A, KAR A. Environmental vulnerability assessment using grey analytic hierarchy process based model[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2016, 56: 145-154.
- [18]SAATY T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83-98.
- [19]党林立,孙晓群.数学建模简明教程[M].西安:西安电子科技大学出版社,2009.
- [20]李海平.社会科学项目综合价值分析与软件开发[D].西安:陕西科技大学,2008.

(责任编辑:李艳)