

基于蚁群算法的振动筛参数优化设计

李玥亭, 张振山, 王振威

上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620

摘要:目的 为研究振动筛的筛分参数对振动筛筛分效率的影响以及筛分颗粒在筛分过程中的运动规律, 对振动筛进行参数优化设计。方法 首先建立振动筛的三维模型, 使用离散元分析软件 EDEM 对振动筛的筛分过程进行模拟仿真并使用正交试验法设计了多组振动筛筛分试验, 通过离散单元法分析了振动筛的振幅、振动频率和振动方向角三个运动学参数对筛分效率的影响。对正交试验结果进行多元非线性拟合, 在拟合函数的基础上使用蚁群算法寻找最佳筛分效率对应的振动参数值。结果 振动频率增大会导致颗粒在筛箱中跳动次数过大, 颗粒一直处于跳起状态, 颗粒通过筛孔的概率降低, 使筛分效率下降。振频对筛分效率的影响与振幅相似, 随着振频的增大, 筛面抖动加剧, 对颗粒的作用力增大, 颗粒在空中的时间增加, 导致颗粒进入筛孔的机率减小, 筛分效率下降。振动方向角增大时, 筛分效率呈先增后减趋势, 方向角过小时, 颗粒朝几乎平行于筛网的方向弹出, 与筛网总接触时间减小, 透过筛孔的砂粒减小, 方向角过大时, 颗粒垂直于筛面弹出, 筛分速度变慢, 颗粒容易在筛面上堆积, 可透过筛孔的颗粒在筛分过程中与筛面接触的机会减小, 最终透过筛孔的颗粒减少, 筛分效率下降。结论 当振幅为 2 mm, 振频为 18 Hz, 振动方向角为 44°时, 振动筛的筛分效果最佳, 此研究对振动筛的优化设计具有一定指导意义。

关键词: 振动筛; 离散单元法; EDEM; 筛分效率; 蚁群算法

中图分类号: TD452 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0002.005

Optimization Design of Vibrating Screen Parameters Based on Ant Colony Algorithm

LI Yueting, ZHANG Zhenshan, WANG Zhenwei

School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: **Objective** In order to study the effect of the screening parameters of the vibrating screen on the screening efficiency of the vibrating screen and the motion law of the screening particles in the screening process, the parameters of the vibrating screen were optimized. **Methods** A three-dimensional model of the vibrating screen was established, the screening process of the vibrating screen was simulated by using discrete element analysis software EDEM, and multiple groups of vibrating screen screening tests were designed by using the orthogonal test method. The effect of the three kinematic parameters of the vibrating screen, namely amplitude, vibration frequency, and vibration direction angle, on the screening efficiency was analyzed by the discrete unit method. Multivariate nonlinear fitting was performed on the orthogonal test results, and the ant colony algorithm was used to find the vibration parameters corresponding to the optimal screening efficiency based on the fitting function. **Results** The results showed that the increase in vibration frequency led to the excessively large beating times of particles in the screening box, and the particles were always in the bouncing state, which reduced the probability of particles passing through sieve holes and the screening efficiency. The influence of vibration frequency on screening efficiency was consistent with that of amplitude. With the increase of vibration frequency, the jitter of the screen surface was intensified, the force on particles was increased, and the time of particles in the air was increased, which led to the decrease in the probability of particles entering the sieve holes and the decrease of screening efficiency. When the vibration direction angle increased, the screening efficiency increased first and then decreased.

收稿日期: 2022-11-07 **修回日期:** 2022-12-26 **文章编号:** 1672-058X(2024)02-0034-08

作者简介: 李玥亭 (1998-), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 从事工业机器人故障诊断研究。

引用格式: 李玥亭, 张振山, 王振威. 基于蚁群算法的振动筛参数优化设计[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 34—41.

LI Yueting, ZHANG Zhenshan, WANG Zhenwei. Optimization design of vibrating screen parameters based on ant colony algorithm[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(2): 34—41.

When the direction angle was too small, the particles popped out in the direction almost parallel to the screen, the total contact time with the screen decreased, and the sand particles passing through the sieve holes decreased. When the direction angle was too large, the particles popped perpendicular to the sieve surface, the screening speed became slower, the particles tended to accumulate on the sieve surface, and the chance of contact between the particles that could pass through the sieve holes and the sieve surface decreased during the screening process. Finally, the particles passing through the sieve holes were reduced, and the screening efficiency decreased. **Conclusion** When the amplitude is 2 mm, the frequency is 18 Hz, and the vibration direction angle is 44° , the screening effect of the vibrating screen is the best. This study has a certain guiding significance for the optimization design of the vibrating screen.

Keywords: vibrating screen; discrete element method (DEM); EDEM; screening efficiency; ant colony algorithm

1 引言

振动筛作为一种被广泛运用于矿业、农业、建筑和其他行业的重要筛分设备,提高振动筛的筛分效率对提升工程作业效率有很大的影响。振动筛通过往复运动将被筛物料筛分为筛下和筛上两部分,小于筛孔的物料通过筛孔的数量越多,振动筛筛分效率越好,振动筛的振幅、振频和振动方向角三个参数影响在筛分过程中被筛物料在筛面上的运动高度、速度和方向,从而影响了整个振动筛的筛分效率,因此,选取合适的运动参数对提高筛分效率起着至关重要的作用^[1]。

与样机试验相比,建模仿真成本低、功能强、应用广,是开展筛分理论和筛分机理研究的高效手段^[2]。离散元法(Discrete Element Method, DEM)是一种数值模拟方法,用于计算离散单元体力学行为^[3],可以模拟离散体与离散体以及离散体和组合体之间的接触碰撞过程,通过对每个离散单元的跟踪研究得到整个系统的运动情况,被广泛应用于筛分作业中。

目前,研究学者对振动筛筛分参数做了大量的研究并取得了一定的研究成果。胡云霄等^[4]利用 DEM 研究振动筛筛面倾角,通过粒子群算法优化支持向量回归机并建立了非线性回归模型从而选取最优参数。闫宏伟等^[5]将离散元法用于一款三层筛网的便携式煤粉制样装置,使用田口正交法进行数据分析,通过分析筛分颗粒的运动状态得到影响筛分效率三个振动参数:最佳振动频率、振动幅度和筛面倾角。李威宏等^[6]考虑振幅、振动方向角、筛频等七个因素对振动筛筛分效率的影响,采用离散元法设计多组实验并进行仿真分析,结合集成学习的方法优化了筛分参数从而提高筛分效率。沈国浪等^[7]使用遗传算法(GA)优化的 BP 神经网络优化平摆复合振动筛的振动参数,解决了筛分理论的研究局限于单因素的问题,考虑了所有因素对筛分效率的影响,提高了筛分效率。

目前的研究大多分别研究单个振动参数对筛分效率的影响,然而,单独研究振动筛的筛分参数不够全

面,各个参数对振动筛筛分效率的影响呈现复杂的非线性关系,多参数对振动筛筛分效率的组合影响研究较少。因此,本文在振动筛与筛分颗粒模型的基础上,使用离散元分析软件 EDEM 对振动筛的筛分过程进行了模拟仿真并使用正交试验法设计多组试验并通过离散单元法对振动筛的振幅、振频和振动方向角三个影响筛分效率的运动学参数进行分析,最后对正交试验结果进行多元非线性拟合,使用蚁群算法寻找最佳筛分效率对应的振动参数值,从而为振动筛的优化设计提供依据。

2 DEM 模型建立

2.1 振动筛模型

EDEM 是用于对颗粒运动过程进行仿真和分析的离散元建模软件^[8],为了模拟物料在振动筛中的筛分过程,研究各参数对筛分效果的影响,将振动筛的简化模型导入到 EDEM 软件中进行仿真分析,如图 1 所示。为了降低计算规模从而提高计算效率,模型去掉了对筛分结果不会造成影响的冗余部分,保留了筛框、筛网、入料口和出料口四个主要筛分部分^[9],筛框框尺寸为 700 mm×360 mm,筛网材料选用 304 不锈钢,筛面倾角为 3° ,正方形筛孔尺寸为 10 mm×10 mm。物料经过筛分后,从 A、B 两个出料口筛出,A 出料口得到通过筛孔的筛下物,B 出料口得到未能通过筛孔的筛上物^[10]。

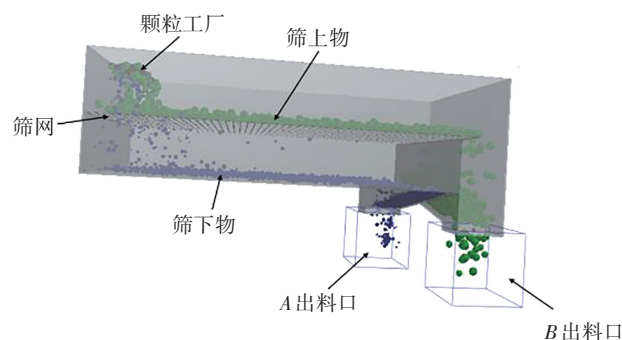


图1 EDEM 中振动筛模型

Fig.1 Vibrating screen model in EDEM

为了进一步研究振动筛运动参数对筛分效率的影响,将振动筛简化得到参数与筛分效率的简要关系,如图 2 所示。 O 点表示振动筛的质心位置,过质心 O 点建立水平方向坐标轴 X 和竖直方向坐标轴 Z ,振动方向角是振动筛的振动方向与筛面之间的夹角,用 β 表示,筛框倾角由筛框与 X 轴之间的夹角 α 表示。

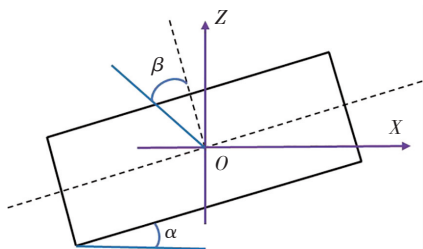


图 2 振动筛的运动简化模型

Fig. 2 Simplified model of the motion of a vibrating screen

颗粒在筛网上运动的剧烈程度由振动强度 K 表示^[11]:

$$K = \frac{Af^2}{g} \cdot \frac{\sin\beta}{\cos\alpha} \quad (1)$$

式(1)中: A 表示振幅; f 表示振频; g 表示重力加速度。

由式(1)可知,振频、振幅和振动方向角都影响了振动强度,振幅增大可以减小筛孔的堵孔现象,振频增大能增加颗粒的跳动次数,方向角增大能增大振动筛的处理量,但振动参数的增大同时意味着颗粒与筛网的接触时间变短^[12],所以进行仿真分析对找到振动筛的最佳振动参数至关重要。

2.2 离散元模型

离散元法(DEM)是以牛顿第二定律为基础的用于研究非连续性物质结构和运动规律的数值方法,采用动态松弛法求解方程^[13]。DEM 的基本运动方程如式(2)所示:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = f(t) \quad (2)$$

式(2)中: m 为质量(kg); c 为阻尼系数($N \cdot s \cdot m^{-1}$); k 为刚度系数($N \cdot m^{-1}$); u 为位移(m); t 为时间(s); f 为单元所受的载荷(N)。

为正确模拟颗粒与筛面以及颗粒与颗粒之间的碰撞过程,本文模拟 DEM 中筛网和颗粒之间的碰撞力学特性,使用经典的 Hertz-Mindlin (no slip) 软球干接触模型,如图 3 所示^[14]。根据库伦摩擦定律求得切向摩擦力,根据接触独立定向恒转矩模型求得滚动摩擦力。由 Hertzian 接触理论可以得到所需模型的法向力分量,由 Mindlin-Deresiewicz 理论可以得到所需模型的切向力分量,二者皆含有阻尼分量。

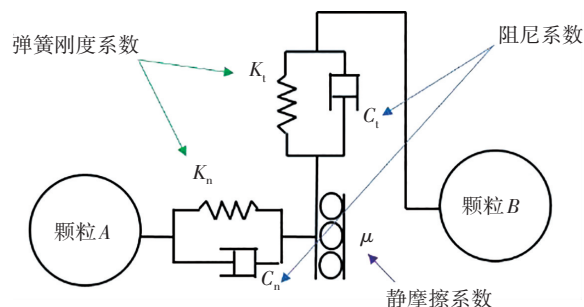


图 3 颗粒接触力学模型图

Fig. 3 Diagram of particles contact mechanics model

根据牛顿第二定律建立相邻颗粒间的运动方程,在任意时刻各个离散单元的线运动和转动分别满足以下运动学方程:

$$\begin{cases} m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} F_{ji} + F_i + F'_i \\ I_i \frac{dw_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (r_{ij} \times F_{ji}) + M_i \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: m_i 表示单元 i 的质量; v_i 表示单元 i 的运动速度矢量; F_{ji} 表示单元 i 与单元 j 间的接触力(方向由 j 指向 i); n_i 表示与单元 i 接触的其他单元数; F_i 表示单元 i 所受外力; F'_i 表示单元 i 所受重力; I_i 表示单元 i 的转动惯量; w_i 表示单元 i 的角速度; r_{ij} 表示由单元 i 的形心指向单元 j 的接触点向量; M_i 表示单元所受外力矩。

2.3 模型参数选取

本文将砂粒作为筛分物料,用不同直径的球单元模拟不同大小的砂粒模型,分别创建直径服从正太分布,均值为 12 mm 和 6 mm 的一大一小两种砂粒模型,总量为 10 000 颗,小颗粒占 70%,颗粒工厂中小颗粒每秒产生的颗粒数为 800 个,大颗粒每秒产生的颗粒数为 500 个,物料颗粒进料速度为 0.1 m/s,模拟时长为 20 s。通过实验测得的材料属性与碰撞特性如表 1、表 2 所示,实验过程如图 4 所示。

表 1 材料属性

Table 1 Properties of materials

	泊松比	剪切模量/MPa	密度/($kg \cdot m^{-3}$)
颗粒	0.2	95	1 550
筛网	0.3	80.92	7 850

表 2 碰撞特性

Table 2 Collision characteristics

	弹性恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
颗粒与颗粒之间	0.2	0.6	0.05
颗粒与筛网之间	0.2	0.4	0.05

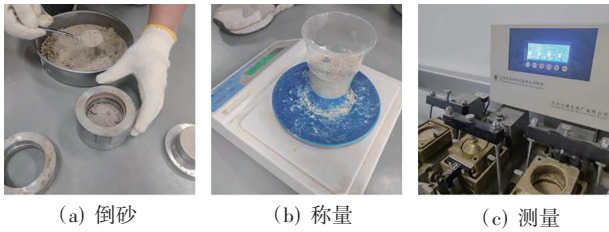


图 4 材料属性测量实验图

Fig. 4 Diagram of material property measurement experiment

2.4 评价标准

筛分结束后,评价振动筛筛分效果,筛分效果评价标准要求能表征筛分作业完成情况,将总筛分效率作为筛分效果的评价标准,能有效表征整个筛分作业完成的程度状况和筛下物的产量^[15],如式(4)所示:

$$\eta_s = \frac{100(\lambda - \theta)(\mu - \lambda)}{\lambda(\mu - \theta)(100 - \lambda)} \times 100\% \tag{4}$$

式(4)中: $\eta_s(\%)$ 表示振动筛总筛分效率; $\lambda(\%)$ 表示筛分颗粒中小于筛孔尺寸的颗粒质量含量; $\theta(\%)$ 表示未能通过筛网的筛分颗粒中小于筛孔尺寸的颗粒质量含量; $\mu(\%)$ 表示通过筛网的筛分颗粒中小于筛孔尺寸的颗粒含量。

当振动筛筛下物只含有小于筛孔尺寸的筛分颗粒时(μ 为 100 时),常用量筛分效率评价振动筛筛分效果,量筛分效率公式如式(5)所示:

$$\eta_l = \frac{100(\lambda - \theta)}{\lambda(100 - \theta)} \times 100\% \tag{5}$$

式(5)中: $\eta_l(\%)$ 表示量筛分效率。

本文通过 EDEM 软件模拟振动筛的筛分过程,因不考虑筛下物中含有大于筛孔尺寸的筛分颗粒,即 μ 为 100 ,所以使用量筛分效率作为计算振动筛筛分效率的指标。

3 离散元仿真分析

本文针对振动筛振动频率、振动幅度和振动方向角三个参数使用离散元分析软件 EDEM 进行仿真分析。为了得到可靠的结果,考虑三个因素之间的交互作用,设计了正交试验,每个因素设计七水平^[16]:振动频率选用 18、20、22、24、26、28、30 Hz,振动幅度选用 2、3、4、5、6、7、8 mm,振动方向选用 30°、35°、40°、45°、50°、55°、60°。经过 EDEM 仿真,得到各因素水平对应的筛分效率,如表 3 所示。

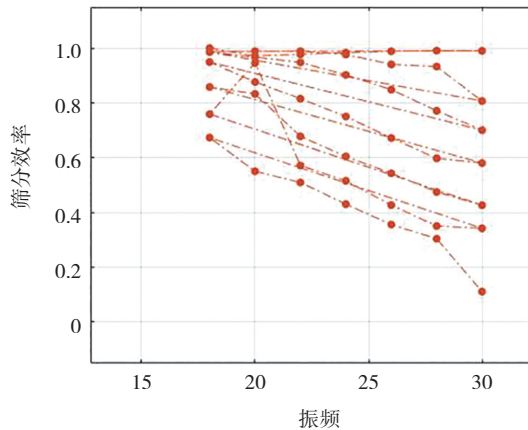
表 3 振动筛振动参数对应的筛分效率表

Table 3 Table of screening efficiency corresponding to vibrating parameters of vibrating screens

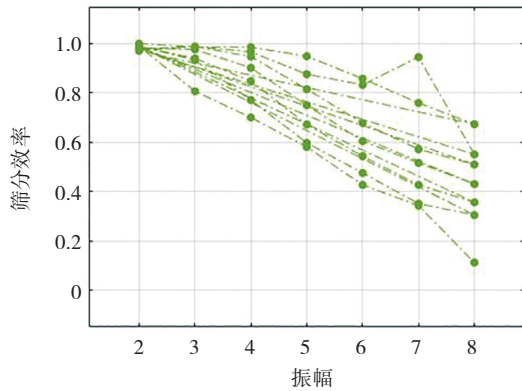
组 号	振频/Hz	振幅/mm	方向角/(°)	筛分效率	组 号	振频/Hz	振幅/mm	方向角/(°)	筛分效率
1	18	2	30	0.999 9	26	24	6	55	0.604 7
2	18	3	35	0.987 3	27	24	7	30	0.516
3	18	4	40	0.985 6	28	24	8	40	0.430 6
4	18	5	45	0.949 2	29	26	2	45	0.988 4
5	18	6	50	0.858 2	30	26	3	55	0.940 7
6	18	7	55	0.759 3	31	26	4	30	0.848 3
7	18	8	60	0.673 3	32	26	5	40	0.672 1
8	20	2	60	0.971 2	33	26	6	50	0.543 3
9	20	3	35	0.988 4	34	26	7	60	0.427 1
10	20	4	45	0.966 8	35	26	8	35	0.356 2
11	20	5	55	0.876 3	36	28	2	40	0.990 9
12	20	6	30	0.833	37	28	3	50	0.932 6
13	20	7	40	0.945 8	38	28	4	60	0.771 3
14	20	8	50	0.550 7	39	28	5	35	0.597 7
15	22	2	55	0.977 5	40	28	6	45	0.475 1
16	22	3	30	0.988 9	41	28	7	55	0.351
17	22	4	40	0.947 6	42	28	8	30	0.304 4
18	22	5	50	0.815 5	43	30	2	35	0.990 1
19	22	6	60	0.677 9	44	30	3	45	0.806 9
20	22	7	35	0.571 6	45	30	4	55	0.700 7
21	22	8	45	0.509 7	46	30	5	30	0.580 6
22	24	2	50	0.983 2	47	30	6	40	0.426 8
23	24	3	60	0.976 5	48	30	7	50	0.342 4
24	24	4	35	0.902 2	49	30	8	60	0.111 7
25	24	5	45	0.750 3					

振动筛的筛分效率与振频、振幅和方向角 3 个参数之间的关系如图 5 所示,振动频率增大会导致颗粒在筛箱中跳动次数过大,颗粒一直处于跳起状态,颗粒通过筛孔的概率降低,使筛分效率下降。振频对筛分

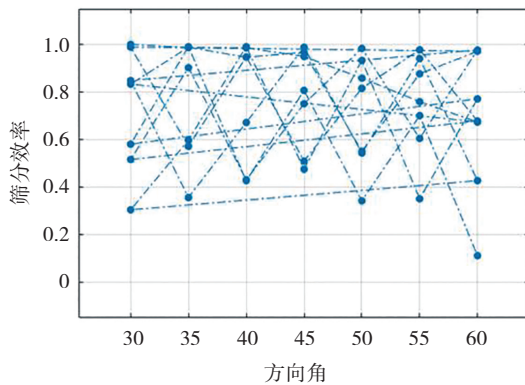
效率的影响与振幅相似,随着振频的增大,筛面抖动加剧,对颗粒的作用力增大,颗粒在空中的时间增加,导致颗粒进入筛孔的机率减小,筛分效率下降。振动方向角增大时,筛分效率呈先增后减趋势,方向角过小时,颗粒朝几乎平行于筛网的方向弹出,与筛网总接触时间减小,透过筛孔的砂粒减小,方向角过大时,颗粒垂直于筛面弹出,筛分速度变慢,颗粒容易在筛面上堆积,可透过筛孔的颗粒在筛分过程中与筛面接触的机会减小,最终透过筛孔的颗粒减少,筛分效率下降^[17]。



(a) 筛分效率与振频的关系图



(b) 筛分效率与振幅的关系图



(c) 筛分效率与方向角的关系图

图 5 三参数对筛分效率的影响关系图

Fig. 5 Diagram of the influence of three parameters on screening efficiency

4 蚁群算法寻优

4.1 函数拟合

振动筛筛分效率与振动参数呈明显的非线性函数关系,为了得到最优参数,建立振动筛筛分效率与振频、振幅和方向角之间的关系方程式,对正交试验所得结果进行多元非线性拟合^[18],用 y 表示筛分效率,分别用 x_1, x_2, x_3 表示振频、振幅和方向角,假设拟合方程为

$$y = a_1 + a_2x_1 + a_3x_2 + a_4x_3 + a_5x_1^2 + a_6x_2^2 + a_7x_3^2 \quad (6)$$

振频与筛分效率拟合后的误差如图 6 所示。

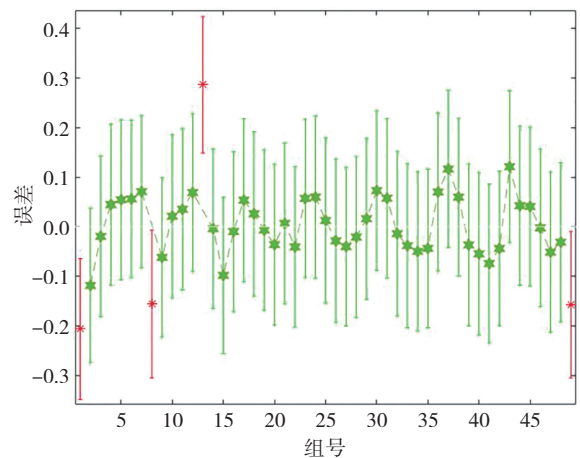


图 6 函数拟合误差图

Fig. 6 Graph of the function fitting errors

函数拟合后的误差除了四组数据外都在可控范围内,说明了拟合函数的有效性。振动参数振频、振幅、方向角与筛分效率的拟合函数表达式为

$$y = 1.284\ 98 - 0.015\ 78x_1 - 0.045\ 37x_2 + 0.017\ 37x_3 - 0.000\ 25x_1^2 - 0.005\ 10x_2^2 - 0.000\ 20x_3^2 \quad (7)$$

为了验证拟合函数与实验结果的一致性,将振动参数两两结合在一起分为三组计算拟合函数对应的筛分效率,如图 6 所示。振幅和方向角对应的振动筛筛分效率如图 7(a) 所示,筛分效率随振幅的增大明显减小,方向角和振频对应的振动筛筛分效率如图 7(b) 所示,随着振动方向角的增大,筛分效率呈先增后减趋势,振频和振幅对应的振动筛筛分效率如图 7(c) 所示,相比于振幅和方向角对筛分效率的影响,振频对筛分效率的影响较为微弱,筛分效率随振频的增大缓慢下降。拟合函数的响应结果与正交试验的结果具有较好的一致性,证明该拟合模型能反应筛分效率对各个振动参数的响应结果,能用于蚁群算法寻优^[19]。

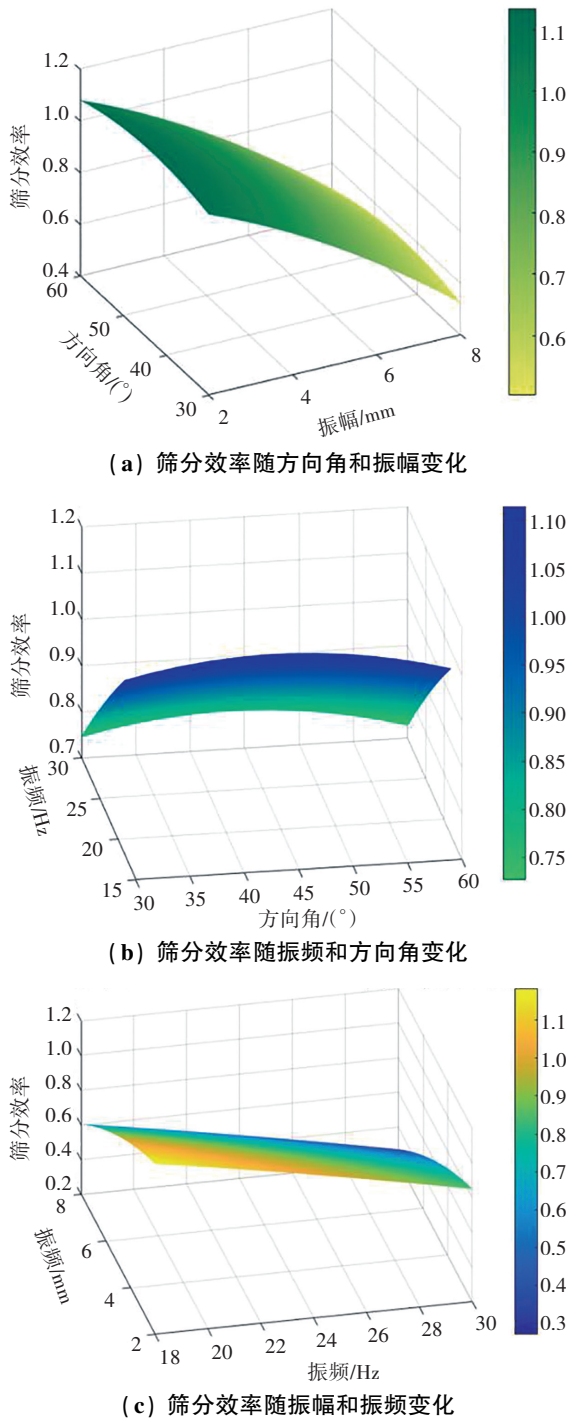


图7 不同振动参数组合下的筛分效率图

Fig.7 Screening efficiency diagram for different combinations of vibration parameters

4.2 蚁群算法模型

蚁群算法是一种具有正反馈性的智能算法,蚁群通过信息素进行交流以完成单个蚂蚁难以完成的复杂任务,分析 n 个城市的经典旅行商问题(TSP)得到基本蚁群算法模型:

(1) TSP 问题指的是假设蚂蚁从 n 个城市中任选一个城市作为出发点,随机去到其他城市且每个城市仅能去往一次,最后再回到出发城市。蚂蚁在城市间

进行路径寻优时,通过路上的信息量和启发式信息计算转移概率,如式(8)所示:

$$p_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{is}(t)]^\beta} \quad (8)$$

$$j \in \text{allowed}_k, s \in \text{allowed}_k$$

式(8)中, α 和 β 分别表示蚁群在搜索路径过程中的信息素和启发式信息的相对重要程度; $p_{ij}^k(t)$ 表示在 t 时刻蚂蚁 k 从城市 i 转移至城市 j 的状态转移概率; $\tau_{ij}(t)$ 是 t 时刻城市 i 与城市 j 之间路径上的信息量, allowed_k 表示蚂蚁 k 允许前往的城市列表。

(2) 为了保证蚂蚁所留信息素的有效性,使用 Ant-Cycle 模型更新信息素, $t+n$ 时刻城市 i 至城市 j 路径上的信息素的更新如式(9)所示:

$$\begin{cases} \tau_{ij}(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \\ \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, ρ 表示信息素变异系数, $1-\rho$ 表示残余信息素系数; $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示本周城市 i 与城市 j 之间的连接路径上第 k 只蚂蚁释放的信息素; $\tau_{ij}(t)$ 表示本周内所有蚂蚁在城市 i 与城市 j 之间的连接路径上释放的信息素;初始时刻 $\tau_{ij}(0) = 0$ 。

4.3 蚁群算法寻优

本文的优化问题是找到使振动筛筛分效率达到最佳的参数值。蚁群算法是用于寻找优化路径的启发式概率型算法,在路径寻优、分配任务和组合优化等方面有广泛的应用。本文将蚁群算法应用于由振频、振幅、方向角和筛分效率构成的四维空间,优化后的可行解代表单个蚂蚁的行走路径,而蚁群整体的步行路径构成了优化的解空间。蚂蚁走过的路径越短,表示蚂蚁释放出的信息要素越多,时间越长,该路径信息要素的积累就越高从而吸引更多的蚂蚁选择此路径,最后,所有的蚂蚁汇集于最佳路径上,即最优解^[20]。

基于四维路径规划寻找振动筛最优筛分效率的振动参数的算法流程主要包括思维空间构件、蚁群搜索策略、信息素更新、循环寻优4个部分,如图8所示^[21]。在由振频、振幅、方向角和筛分效率构成的四维空间中,蚁群从初始点开始行走,在点与点之间,蚁群根据启发函数计算可行域中各点的选择概率,选择可达到的效益最大点。信息素更新分为局部更新和全局更新两种更新方式,局部更新为蚂蚁每次经过节点时降低信息素所进行的更新,当一条路径搜索完成后,蚂蚁根据效益增加信息素进行全局更新。最后经过循环寻优获得全局最佳路径,即最大筛分效率对应的振动参数值。

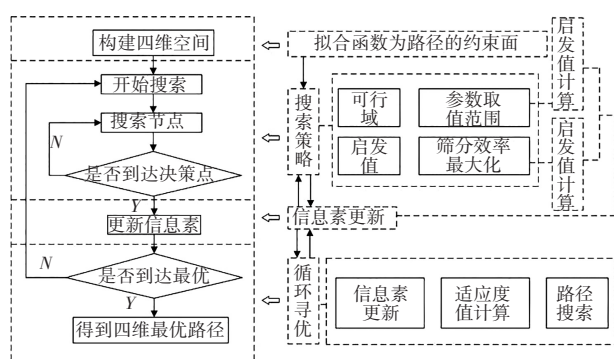
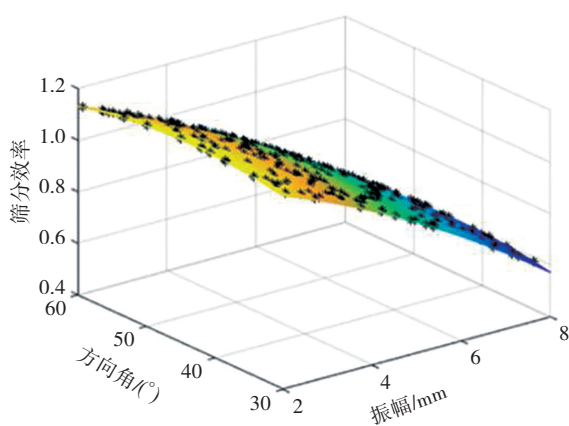


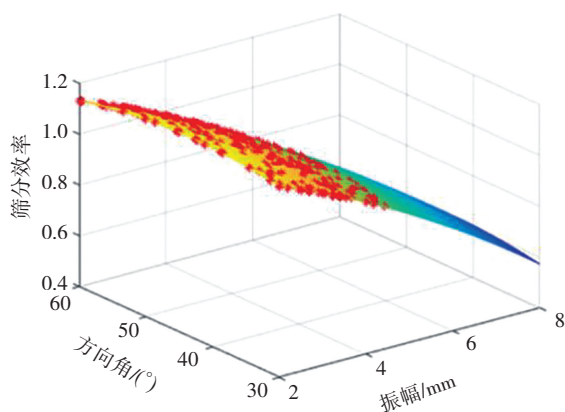
图 8 蚁群算法寻优流程图

Fig. 8 Graph of optimization process of ant colony algorithm

蚁群一开始的随机初始位置覆盖了整个面,搜索节点后缓慢朝终点行走,在信息素的诱导下,到达最优终点,得到最优路径,从而获得优化问题的最优解,蚁群在方向角、振幅和筛分效率组成的三维面的寻优行走路径如图 9 所示,蚁群朝振幅最小,筛分效率最高的位置移动,复合正交试验的结果。经过蚁群算法寻优,最终得到振动筛筛分效率最大时的最优参数:振幅为 2 mm,振频为 18 Hz,振动方向角为 44° ,与正交试验结果对比表明,计算结果可靠,证明了蚁群算法寻优的有效性。



(a) 蚁群初始位置



(b) 蚁群最终位置

图 9 蚁群行走路程图

Fig. 9 Map of ant colony path

5 结论

为提高振动筛筛分效率,使用建模仿真的方法,通过 DEM 建立振动筛模型,选取模型参数及对筛分结果的评价标准,研究振频、振幅和振动方向角对筛分效率的影响情况。用正交试验的方法进行了 49 组振动筛筛分过程的仿真试验,通过试验结果分析了振频、振幅和振动方向角三个参数对振动筛筛分效率的组合影响,研究了三个振动参数对筛分效率的影响规律及其原因。对振动筛振动参数与筛分效率的试验结果进行多元非线性回归拟合,得到拟合关系式,通过与正交试验的结果对比分析验证了拟合函数的有效性,可用于优化处理。使用蚁群算法在拟合模型的基础上对振动筛进行参数优化,优化后的振动筛振动参数为:振幅为 2 mm,振频为 18 Hz,振动方向角为 44° ,优化后的筛分效率接近 100%,此研究对振动筛的优化设计具有一定指导意义。

参考文献 (References):

- [1] 张凡, 李玲玲, 马学东. 基于 EDEM-FLUENT 耦合矿物颗粒分离效果的模拟研究[J]. 矿产综合利用, 2022, 238(6): 159—166.
ZHANG Fan, LI Ling-ling, MA Xue-dong. Simulation study on separation effect of mineral particles based on EDEM-FLUENT coupling[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022, 238(6): 159—166.
- [2] 夏绪辉, 荆为民, 张泽琳, 等. 振动筛仿真研究、应用现状及发展趋势[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(10): 2689—2706.
XIA Xu-hui, JING Wei-min, ZHANG Ze-lin, et al. Simulation research, application status and development trend of vibrating screen[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(10): 2689—2706.
- [3] ZHAO L H, LIU X N, MAO J, et al. A novel discrete element method based on the distance potential for arbitrary 2D convex elements[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2018, 115(2): 238—267.
- [4] 胡云霄, 李占福, 童昕. 基于 PSO-SVR 双层不平行振动筛分性能的数值仿真[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(3): 198—202, 207.
HU Yun-xiao, LI Zhan-fu, TONG Xin. Numerical simulation research on performance of double-layer non-parallel vibrating screen based on PSO-SVR[J]. Machine Design and Research, 2021, 37(3): 198—202, 207.
- [5] 闫宏伟, 刘翼, 李健, 等. 基于 EDEM 的煤粉制样装置筛分性能仿真与试验[J]. 武汉大学学报(工学版) 2021, 54(7): 658—667.
YAN Hong-wei, LIU Yi, LI Jian, et al. Simulation and experiment of screening performance of pulverized coal sample

- device based on EDEM[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(7): 658—667.
- [6] 李威宏,童昕,李占福,等.集成学习在直线振动筛的应用及参数优化[J].华侨大学学报(自然科学版),2020,41(6): 695—700.
- LI Wei-hong, TONG Xin, LI Zhan-fu, et al. Application and parameter optimization of ensemble learning in linear vibrating screen[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2020, 41(6): 695—700.
- [7] 沈国浪,童昕,李占福.应用 GA-BP 神经网络优化平摆复合振动筛的振动参数[J].华侨大学学报(自然科学版),2018,39(4): 509—513.
- SHEN Guo-lang, TONG Xin, LI Zhan-fu. Application of GA-BP to optimize vibration parameters of vibrating screen of translation-swing composite motion[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2018, 39(4): 509—513.
- [8] 王壮.基于 EDEM 螺旋筛分机筛分效率的研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2021.
- WANG Zhuang. Research on screening efficiency of spiral screening machine based on EDEM[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2021.
- [9] LI Z F, TONG X, ZHOU B, et al. Modeling and parameter optimization for the design of vibrating screens[J]. Minerals Engineering, 2015, 83: 149—155.
- [10] 沈国浪,童昕,李占福.基于离散单元法对振动筛仿真实验次数分析[J].机械设计与研究,2019,35(2): 110—112, 116.
- SHEN Guo-lang, TONG Xin, LI Zhan-fu. Study on the number of simulation experiments of vibrating screen based on DEM[J]. Machine Design and Research, 2019, 35(2): 110—112, 116.
- [11] PENG L P, WANG Z Q, MA W D, et al. Dynamic influence of screening coals on a vibrating screen[J]. Fuel, 2018, 216: 484—493.
- [12] 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,2010,38(15): 102—106.
- WANG Gui-feng, TONG Xin, CHEN Yan-hua, et al. Study on influence of sieving parameters of vibration screen on sieving efficiency based on DEM[J]. Mining Machinery, 2010, 38(15): 102—106.
- [13] 赵艳波,马麟,刘波,等.基于离散元法的纯铁粉振动填充密度分析[J].粉末冶金技术,2020,38(6): 429—435.
- ZHAO Yan-bo, MA Lin, LIU Bo, et al. Analysis on vibration packing density of pure iron powders based on discrete element method[J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38(6): 429—435.
- [14] 刘义伦,苏家辉,赵先琼,等.基于离散元法的振动筛的筛分效率研究[J].东北师大学报(自然科学版),2018,50(4): 78—83.
- LIU Yi-lun, SU Jia-hui, ZHAO Xiao-qiong, et al. The study of vibrating screen efficiency based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2018, 50(4): 78—83.
- [15] 曾乙伦,甯尤军.直线振动筛筛分过程与效果的动力学模拟分析[J].机械设计与研究,2020,36(2): 163—168.
- ZENG Yi-lun, NING You-jun. Dynamics simulation analysis of screening process and effect of linear vibrating screen[J]. Machine Design and Research, 2020, 36(2): 163—168.
- [16] 程超,付君,陈志,等.收获机振动筛振动参数影响不同湿度脱出物粘附特性[J].农业工程学报,2019,35(8): 29—36.
- CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Effect of vibration parameters of vibrating screen for harvester on adhesion characteristics of threshed mixtures with different moistures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2019, 35(8): 29—36.
- [17] 李洪昌,李耀明,唐忠,等.基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J].农业工程学报,2011,27(5): 117—121.
- LI Hong-chang, LI Yao-ming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 117—121.
- [18] 陈兵,燕纪威,尹忠俊,等.基于 DEM 的高频振网筛多参数优化[J].工程科学学报,2021,43(6): 852—861.
- CHEN Bing, YAN Ji-wei, YIN Zhong-jun, et al. Multi-parameter optimization of high-frequency vibrating screen based on DEM[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 852—861.
- [19] SU Y Y, BAI Z C, XIE D B. The optimizing resource allocation and task scheduling based on cloud computing and ant colony optimization algorithm[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12: 1—9.
- [20] PASANDI L, HOOSHMAND M, RAHBAR M. Modified A * algorithm integrated with ant colony optimization for multi-objective route-finding; case study: Yazd[J]. Applied Soft Computing Journal, 2021, (113): 107877.
- [21] 赵蕾,高建立.基于三维路径规划蚁群算法的家庭生命周期消费决策[J].系统工程,2020,38(6): 147—155.
- ZHAO Lei, GAO Jian-li. Household consumption decision in life-cycle based on ant colony algorithm of 3-dimensional path planning[J]. Systems Engineering, 2020, 38(6): 147—155.