

# 多层组合回转筛的动力学仿真分析

张 野,张 超,张昊晨,刘海芃,高 涛

(河南工业大学 机电工程学院,郑州 450001)

**摘要:**旨在为多层组合回转筛筛体的设计优化及使用调试提供参考,对大产量多层组合回转筛的动力学模型进行了理论分析,推导出了筛体的动力学方程及参数,在此基础上,通过虚拟样机技术进行动力学建模仿真,得到筛体启动运动轨迹及稳定运行轨迹,分析了影响筛体安全(最大振幅)和效率(回转速度、回转半径)关键参数间的关系。结果表明:筛体运动逐渐从椭圆形接近正圆形,正圆的半径即为筛体稳态运行时的回转半径;回转速度与稳定运行过程中的回转半径呈负相关,与启动过程中的最大振幅呈正相关。

**关键词:**多层组合回转筛;虚拟样机;动力学仿真

中图分类号:TS210.3;TS203

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2025)01-0141-06

## Dynamic simulation analysis of multilayer combined rotary screen

ZHANG Ye, ZHANG Chao, ZHANG Haochen, LIU Haipeng, GAO Tao

(College of Mechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** To provide a reference for the body design optimization and operational debugging of multilayer combined rotary screen, the dynamic model of large - yield multilayer combined rotary screen was theoretically analyzed, the motion equation and dynamic parameters of the screen body were derived, then the dynamic modeling simulation was carried out through virtual prototyping technology. The transient motion trajectory during the start - up process of the screen body and the motion trajectory during stable operation were obtained, and the relationship between key parameters affecting the safety (maximum amplitude) and efficiency (rotation speed and rotation radius) of the screen body were analyzed. The results indicated that the motion of the screen body gradually transitioned from elliptical to approximately circular. The radius of the perfect circle corresponded to the rotation radius during the steady - state operation of the screen body. The rotation speed was negatively correlated with the rotation radius during stable operation and positively correlated with the maximum amplitude during the start - up process.

**Key words:** multilayer combined rotary screen; virtual prototyping; dynamic simulation

平面回转筛是粮食行业广泛使用的清理设备,物料在筛体内相对筛面做近似螺旋线下滑运动<sup>[1-3]</sup>,物料在筛体内运动路径较长,因此相比振动

筛和圆筒筛具有良好的筛分效果,但是存在处理物料量小等不足。多层组合回转筛是以平面回转筛为基础所设计的高效新型清理筛,通过筛面并联的形式提高产量,集成多种清理方法来提高筛分效果,筛网可分离不同尺寸的大杂和中杂,进出口的两次风选可以吸走清杂,进而弥补其他筛分设备的不足,是近年来发展应用较快的清理筛<sup>[4-5]</sup>。物料中杂质的筛分清除效率间接影响了粮油加工的效率,筛体对筛分效率最主要的影响因素是回转半径、回转速度和最大振幅,探究三者之间的相互关系是优化和设计多层组合回转筛最佳参数的前提。

收稿日期:2023-07-19;修回日期:2024-09-15

基金项目:河南省科技攻关项目-小麦制粉研磨过程中微观品质可控及节能技术应用研究(242102110133);河南省科技研发计划联合基金-小麦制粉智能装备适度加工机理及应用研究(242103810063)

作者简介:张 野(1999),男,硕士研究生,研究方向为粮油加工装备(E-mail)1240660906@qq.com。

通信作者:张 超,硕士生导师,博士(E-mail)zcyj@haut.edu.cn。

虚拟样机技术作为进行样机设计、仿真研究复杂机械系统动力学问题的有效手段,可以为筛分机械的结构设计及优化提供参考和指导<sup>[6-9]</sup>。Soldinger<sup>[10-11]</sup>研究了理想状态下圆球颗粒在筛面上的透筛概率筛分理论、筛面上物料的分层和透筛行为,并基于筛上物料粒度组成的变化规律,采用迭代的方法建立了筛分数学模型。Singh<sup>[12]</sup>由单颗粒运动方程推导出颗粒群的碰撞运动方程。王中营等<sup>[13]</sup>建立了振动筛动力学模型,并基于 ADAMS 建立振动筛的虚拟样机模型,通过动力学理论模型计算和虚拟样机仿真验证了振动筛的振幅和运动轨迹。Li 等<sup>[14]</sup>使用离散元法通过模拟颗粒流动状态进行参数优化。以上学者研究了颗粒在筛面上的运动仿真,对筛体本身的动力学分析相对较少,而筛体本身的动力学分析是研究颗粒仿真的基础。本文以多层组合回转筛为研究对象进行动力学理论分析,根据理论分析结果和虚拟样机技术对多层组合回转筛进行动力学仿真,观察不同时间段筛体的运动轨迹,并分析影响筛体安全和效率的因素关系,以期筛体的设计优化及使用调试提供参考。

1 多层组合回转筛的结构

多层组合回转筛结构如图 1 所示。多层组合回转筛由风选装置、进料装置、出料装置、驱动装置、吊挂装置、筛箱和机架等组成,可根据产量需求在筛箱中设置 4~8 层筛格,筛格由 6~8 个筛框组成,每层筛格有大杂筛面和小杂筛面 2 层筛面:原粮由进料斗进入匀料箱后均匀分散到各层筛格上,经过筛面筛分后的大、小杂及净粮分别由大、小杂出口和净粮出口排出。电动机固定在筛箱一侧,通过皮带传动将动力传递到位于筛箱内部带有偏重块的带轮上,由偏重块旋转产生的离心惯性力驱动筛体运动,筛体通过 4 组玻璃钢吊杆固定在机架上。

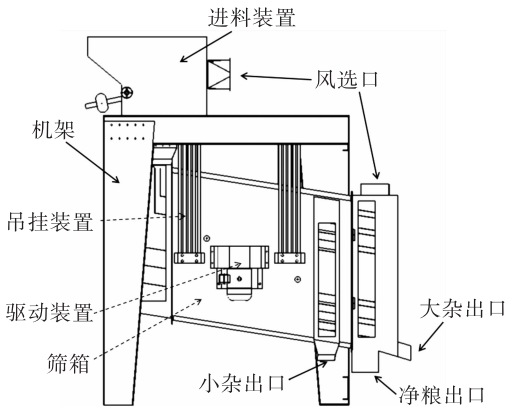


图 1 多层组合回转筛结构

Fig.1 Structure of multilayer combined rotary screen

2 多层组合回转筛的动力学模型

2.1 动力学模型

对于多层组合回转筛的动力学研究,不考虑机架的运动和变形,将机架视为刚性体。假设吊挂装置的上端直接与机架刚性连接,为固定端;下端与筛箱连接,为自由端。在此基础上,本文以筛体-偏重块-吊挂装置组成的系统为研究对象,建立四自由度( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴方向的平动和  $Z$  轴方向的转动)的动力学模型<sup>[15-17]</sup>,如图 2 所示。

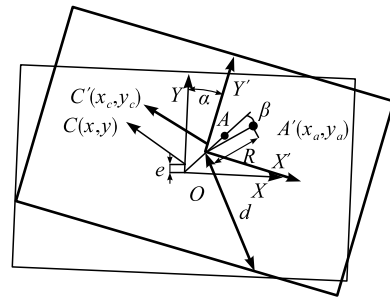


图 2 运动中多层组合回转筛系统的动力学模型

Fig.2 Dynamic model of multilayer combined rotary screen system

由图 2 可知,在多层组合回转筛的设计中偏重块和筛体的质心位于同一水平面,以初始状态时筛体的几何中心点为坐标原点,筛箱长度方向为  $X$  轴,宽度方向为  $Y$  轴,建立动力学模型中的坐标系。由于电机位于筛箱一侧,筛体的质心与其几何中心并不重合,参考样机参数假设质心  $C$  点相对于几何中心  $O$  点向电机侧的偏移量( $e$ )为 44 mm。当筛体启动后运行到某一时间,筛体几何中心到达点  $C(x, y)$ ,筛体质心到达点  $C'(x_c, y_c)$ ,偏重块质心从点  $A$  到达点  $A'(x_a, y_a)$ ,筛体旋转角度为  $\alpha$ ,偏重块相对于筛体的垂直旋转角度为  $\beta$ ,偏重轴中心与筛体质心重合,偏重块质心与偏重轴中心线之间的距离为  $R$ (简称“偏心距”)。

假定筛体运行中筛体重心的高度不变,由于吊杆发生弹性变形,系统势能主要是吊杆的弹性势能。因此,系统的动能( $T$ )、势能( $V$ )和总质量可表示为式(1)~式(3)。

$$T = \frac{1}{2} m_j (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + \frac{1}{2} J \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_a^2 + \dot{y}_a^2) \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} Kx^2 + \frac{1}{2} Ky^2 + \frac{1}{2} Kd^2\beta + \frac{1}{2} K'\beta^2 \quad (2)$$

$$m_j = m_x + m_q + m_w \quad (3)$$

式中: $m_j$  为筛体质量; $m_x$  为筛箱质量; $m_q$  为驱动装置质量(不含偏重块); $m_w$  为影响筛体运动的物料结合质量; $J$  为筛体的转动惯量; $m_p$  为偏重块质量; $K$  为 4 组吊杆做弯曲振动时的等效弯曲刚度; $K'$  为 4 组吊杆做扭转振动时的等效扭转刚度;

$d$  为筛体几何中心到 4 组吊杆自由端的平均水平距离。

通过分析可知,筛体具有 3 个方向的平动和垂直方向的转动,适用于完整约束系统的第二类拉格朗日方程建立多层组合回转筛的四自由度动力学方程<sup>[18]</sup>,见式(4)。

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad i=1,2,3,4 \quad (4)$$

式中: $q_i$  为系统的广义坐标; $Q_i$  为广义力。

将式(2)和式(3)代入式(4),可得到多层组合回转筛的非线性动力学方程,见式(5)。

$$\begin{cases} (m_j + m_p)\ddot{x} - m_p R[\sin(\alpha + \beta)(\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}) + \cos(\alpha + \beta)(\dot{\alpha} + \dot{\beta})^2] - m_j e(\sin\alpha \ddot{\alpha} + \cos\alpha \dot{\alpha}^2) + Kx = 0 \\ (m_j + m_p)\ddot{y} + m_p R[\cos(\alpha + \beta)(\ddot{\alpha} + \ddot{\beta}) - \sin(\alpha + \beta)(\dot{\alpha} + \dot{\beta})^2] + m_j e(\cos\alpha \ddot{\alpha} - \sin\alpha \dot{\alpha}^2) + Ky = 0 \\ (J + m_p R^2 + m_j e^2)\ddot{\alpha} + m_p R[\cos(\alpha + \beta)\dot{y} - \sin(\alpha + \beta)\dot{x}] + m_p R^2 \ddot{\beta} + m_j e(\cos\alpha \ddot{\alpha}_y - \sin\alpha \ddot{\alpha}_x) + Kd^2 \alpha + K' \alpha = T_b \\ m_p R^2 \ddot{\beta} + m_p R^2 \ddot{\alpha} + m_p R[\cos(\alpha + \beta)\dot{y} - \sin(\alpha + \beta)\dot{x}] = T_\beta - T_b \end{cases} \quad (5)$$

式中: $T_\beta$  为驱动电机作用在偏重轴上的等效扭矩; $T_b$  为驱动装置的支撑架作用在偏重轴上的摩擦扭矩。

## 2.2 多层组合回转筛的稳态运动分析

多层组合回转筛系统在稳态运行状态下,偏重块以一定角频率( $\omega$ )作匀速转动。当筛体扭转一定角度后 4 组吊杆扭转产生的扭矩与偏重块作用在驱动装置支撑架上的摩擦扭矩相平衡,此时筛体没有转动,有式(6)条件成立。

$$\begin{cases} \beta = \omega t & \dot{\beta} = \omega & \ddot{\beta} = 0 \\ T_\beta = T_b & \dot{\alpha} = \ddot{\alpha} = 0 & \alpha = \alpha_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $t$  为时间。

$X$ 、 $Y$  轴方向的运动位移见式(7)。

$$\begin{cases} x = -r \cos(\omega t + \alpha_0) \\ y = -r \sin(\omega t + \alpha_0) \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)代入式(5)得筛体的运动方程,见式(8)。

$$\begin{cases} (m_j + m_p)\ddot{x} + Kx = m_p R \omega^2 \cos(\omega t + \alpha_0) \\ (m_j + m_p)\ddot{y} + Ky = m_p R \omega^2 \sin(\omega t + \alpha_0) \\ \cos(\omega t + \alpha_0)\dot{y} = \sin(\omega t + \alpha_0)\dot{x} \end{cases} \quad (8)$$

从式(7)可以看出,筛体在  $X$  轴方向和  $Y$  轴方向受到简谐载荷的受迫振动,动载荷来自于偏重块的离心惯性力。

筛体的固有圆频率( $\omega_n$ )方程见式(9)。

$$\omega_n = \sqrt{K/(m_j + m_p)} \quad (9)$$

将式(7)和式(9)代入式(8)得筛体质心的回

转半径( $r$ ),见公式(10)。

$$r = \frac{m_p R}{m_j + m_p} \times \frac{1}{1 - (\omega_n/\omega)^2} \quad (10)$$

从以上理论分析推导结果可以看出:筛体的振动是由 2 个分别沿  $X$  轴和  $Y$  轴方向、频率相同、相位差为 90 的简谐振动相叠加。因此,筛体的稳态振动是半径为  $r$  的回转圆运动。影响回转运动半径的因素是偏心距、筛体和偏重块的质量以及固有圆频率与激振力圆频率(角频率)的比值。

根据式(9)和式(10)可知:当筛体质量和偏心距一定时,偏重块的质量越大,其离心惯性力越大,筛体的回转半径就越大;角频率越大,即筛体的回转速度越大,筛体的回转半径反而越小。

## 3 多层组合回转筛的动力学仿真实验

### 3.1 刚柔耦合模型的建立

筛体通过相对于几何中心对称的 4 组玻璃钢吊杆吊挂固定,吊杆长度为 1 200 mm,该材料杨氏模量为 2.6 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>,根据吊杆的等效刚度原则,将虚拟样机模型中的 20 根吊杆简化为 4 根,可得 5 根玻璃钢吊杆等效直径为 23.93 mm,等效弯曲刚度( $K$ )约为 232.34 N/m。在多体动力学仿真软件 ADAMS 中建立多层组合回转筛的虚拟样机模型,见图 3。

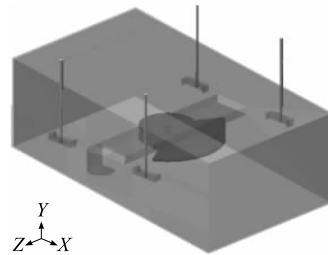


图 3 多层组合回转筛的虚拟样机模型

Fig. 3 Virtual prototyping model of a multilayer combined rotary screen

### 3.2 筛体模型参数设计

以虚拟样机模型筛体的几何中心为坐标原点,筛箱尺寸为长 2 380 mm,宽 1 500 mm,高 1 720 mm。设置筛体材料为 Q235 碳钢,由建模软件 SolidWorks 计算得出筛体质量为 2 162 kg,设计偏重块质量为 144 kg,筛体驱动转速为 300 r/min,偏心距( $R$ )为 320 mm,结合式(9)计算固有圆频率与激振力圆频率比值约为 0.010,由式(10)计算筛体的理论回转半径约为 19.98 mm。

系统阻尼能够有效降低振动系统在通过共振区时的最大共振振幅和缩短进入稳态运行的时间,从而避免结构在通过共振区时产生较大的应力而受损,但过大的结构阻尼会增大设备的功耗。通过

ADAMS 仿真结合实验测得长 1 000 mm、直径 16 mm 的玻璃钢吊杆材料阻尼系数为 0.000 635, 阻尼比为 0.007 34, 材料损耗因子取 0.013 4, 本文后续动力学仿真计算时选取该组数值作为系统的阻尼参数。

### 3.3 ADAMS 数值仿真结果

基于 ADAMS 软件建立多层组合回转筛虚拟样机模型, 进行多层组合回转筛的运动仿真, 仿真参数设置如下: 启动时间 3 s, 制动时间 7 s, 驱动总时间 150 s, 仿真运行总时间 200 s, 时间步长 0.01 s。选取筛箱 9 个特征点 A ~ H 点和 O 点(系统中心点)进行标记, 如图 4 所示。

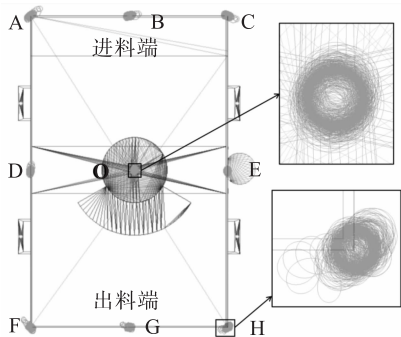


图 4 筛体上标记点的运动轨迹

Fig. 4 Motion trajectory of the marked points on the screen body

以地面为固定参考坐标系, 分别绘制出在筛体稳定运行过程中特征点位在水平面内纵向和横向的位移轨迹变化曲线。图 5 和图 6 分别为标记点 H 在水平纵向 X 轴和水平横向 Y 轴的位移变化曲线。

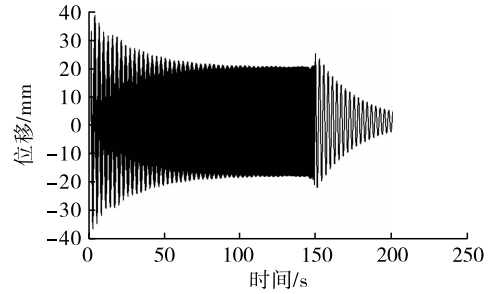


图 5 标记点 H 在水平纵向 X 轴的位移变化曲线

Fig. 5 Displacement change curve of marker point H along the horizontal longitudinal X-axis

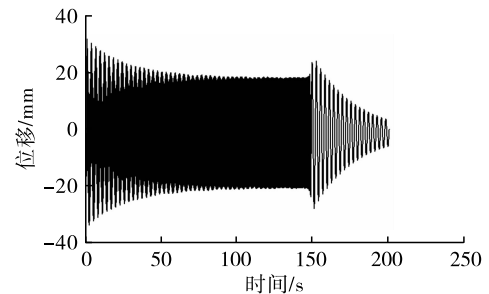


图 6 标记点 H 在水平横向 Y 轴的位移变化曲线

Fig. 6 Displacement change curve of marker point H along the horizontal transverse Y-axis

由图 5、图 6 可知, 筛体启动过程中在水平 2 个方向的振幅均有明显增大, 这是因为多层组合回转筛此时经过振动系统的共振区, 筛体的振动频率接近系统的固有频率。在 60 s 左右, 由于系统阻尼的作用, 筛体的位移逐渐稳定在 20 mm 左右。

标记点 O 在全周期的运动轨迹如图 7 所示。

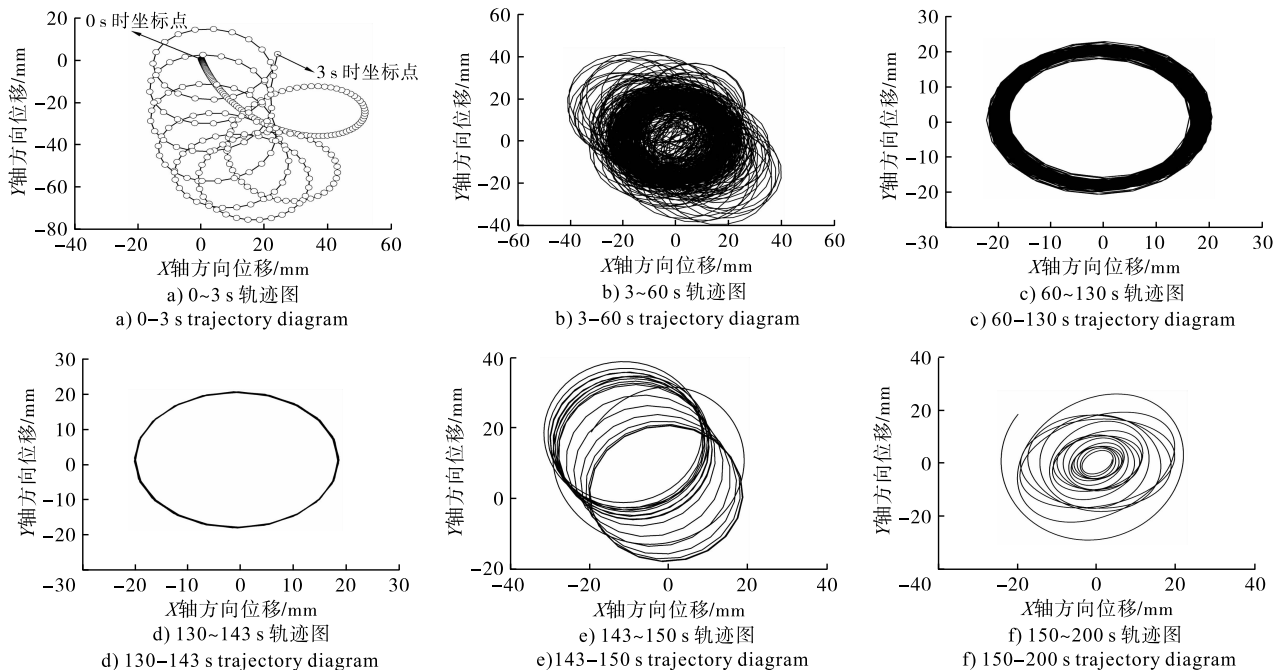


图 7 筛体运行过程中标记点 O 的运动轨迹曲线

Fig. 7 Motion trajectory curve of marker point O during the operation of the screen body

从图 7a 可以看出,在相同步长内筛体标记点 O 的运动间隔逐渐增加,此时间段筛体在 X、Y 轴方向的位移变化较大,且运动轨迹自由变化无规律。这是因为在启动阶段筛体的运动为自由振动和受迫振动的叠加运动,并且自由振动在结构阻尼的作用下随时间逐步衰减。从图 7b 可以看出,在 3~60 s 时筛体的运动轨迹为填充椭圆形。从图 7c 可以看出,在 60~130 s 时筛体的运动轨迹逐渐接近正圆线。

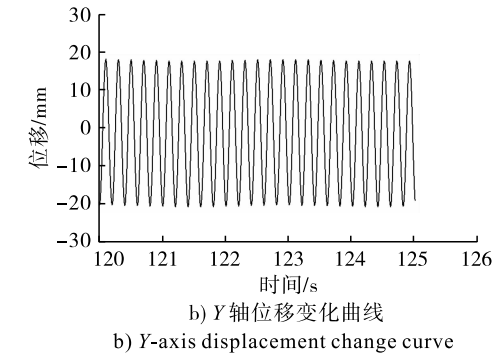
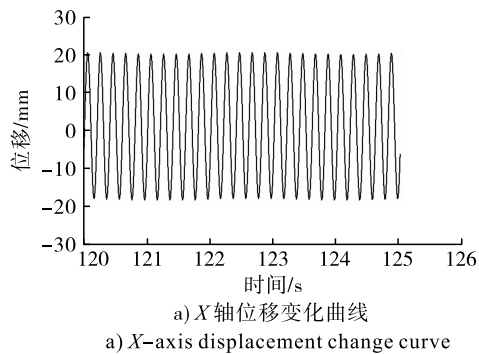


图 8 筛体稳态运行中标记点 O 的位移变化曲线

Fig. 8 Displacement change curve of marker point O in steady-state operation of the screen body

由图 8 可知,筛体在稳态运行时间内(120~125 s)的位移随时间呈周期性变化,而且振幅的周期性变化完全稳定。筛体在 X 轴方向的平均振幅为 19.24 mm,在 Y 轴方向的平均振幅为 19.23 mm,筛体在 X 轴方向和 Y 轴方向的回转振幅基本一致,因此筛体在 XOY 平面内做标准回转圆运动,回转半径近似为 19.24 mm,与上述计算的回转半径理论值 19.98 mm 误差为 3.7%,说明仿真结果与理论计算值较为接近,建立的多层组合回转筛虚拟样机模型具有可行性。

### 3.4 筛体回转运动的影响因素分析

影响物料筛分效率的主要参数是筛体的回转速度和回转半径,筛分效率随回转速度的增大而增大,随回转半径的减小而增大,合理调节回转速度和回转半径是提高筛体效率的关键;影响筛体安全运行的主要参数是启动过程中的最大振幅,最大振幅越大筛体的稳定性越低。3 个参数中回转速度对回转半径和最大振幅有耦合影响,因此对这 3 个参数间的关系进行分析。

在激振力一定,筛体回转速度范围为 300~540 r/min<sup>[19]</sup>,每组转速增幅为 60 r/min 的条件下,进行 5 组回转速度仿真,统计每组仿真筛体的最大振幅和回转半径,结果如图 9 和图 10 所示。

对图 9~图 10 数据进行回归分析,分别得到多层组合回转筛的回转速度与筛体最大振幅和回转半径之间的拟合方程,分别见式(11)和式(12)。

从图 7d 可以看出,120 s 后筛体的自由振动已经完全消失,筛体的运动轨迹为正圆,此时筛体处于稳定工作状态,正圆半径为筛体回转半径。图 7e、图 7f 是筛体在停止过程中的运动轨迹,由于激振力的减小,回转半径逐渐减小。

图 8 为筛体在稳态运行时间内(120~125 s)标记点 O 的位移随时间的变化。

$$y = -0.000\ 018\ 1x^2 + 0.023x + 27.726 \quad (11)$$

$$y = 22.382\ 31x^{-0.026\ 7} \quad (12)$$

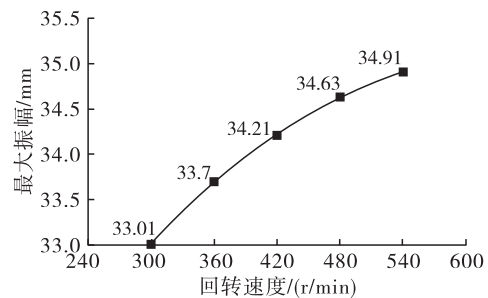


图 9 回转速度对筛体最大振幅的影响

Fig. 9 Effect of the rotation speed on the maximum amplitude of the screen body

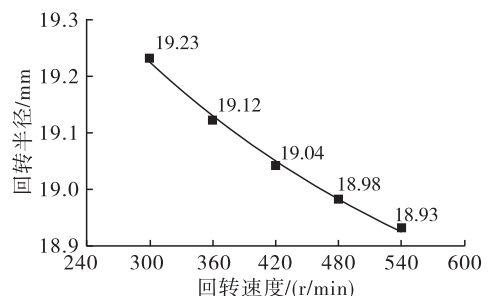


图 10 回转速度对筛体回转半径的影响

Fig. 10 Influence of the rotation speed on the rotation radius of the screen body

对拟合方程式(11)和式(12)进行显著性分析,结果显示,拟合结果的统计学决定系数( $R^2$ )均大于 0.99,回归效果显著,曲线拟合效果较好。由图 9 和

图 10 可知,回转速度与最大振幅呈正相关,与回转半径呈负相关。回转速度与筛体的最大振幅和回转半径间并不具有显著的线性关系,随着回转速度的增大,在启动过程中最大振幅的增幅逐渐放缓,在稳定运行过程中,回转半径的降幅逐渐减小,这可能是随着回转速度的增大,箱体与空气的摩擦增大导致。

#### 4 结 论

本文应用第二类拉格朗日方程推导出多层组合回转筛的动力学方程,通过虚拟样机技术模拟出了筛体启动过程及稳定工作过程中的运动轨迹,并分析了影响筛体安全和效率的因素关联,得出:筛体运动逐渐从椭圆形接近正圆形,正圆的半径即筛体稳态运行时的回转半径;回转速度与稳定运行过程中的回转半径呈负相关,与启动过程中的最大振幅呈正相关。本文为不同工况、不同产量要求的多层组合回转筛的设计优化及使用调试提供了理论依据和技术参考。

#### 参考文献:

- [1] 胡继云,殷学纲,于翠萍. 大型惯性振动筛偏重块的优化设计[J]. 郑州工程学院学报, 2002, 23(3): 60 - 61, 65.
- [2] 胡继云,雷飞,秦玉良. 惯性往复振动机械阻尼值设计的理论研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 19 - 23.
- [3] 胡继云,殷学纲,于翠萍. 弹性杆吊挂平面回转筛启动过程的动力学分析[J]. 动力学、振动与控制研究:力学, 2002,34(增刊):403 - 408.
- [4] 张昊晨. 组合回转筛的筛理过程研究[D]. 郑州:河南工业大学,2023.
- [5] 郭关柱,张易楷,罗亚南,等. 四层筛式花椒筛选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 203 - 211, 230.
- [6] 吴军永,张保伟,付云峰. 基于 Solid Works Motion 的高方平筛仿真分析[J]. 粮食加工, 2020, 45(1): 53 - 56.
- [7] 任建莉,周佳妮,韩龙,等. 散料在垂直螺旋输送机中的运动规律分析[J]. 热能动力工程, 2018, 33(6): 77 - 82, 136.
- [8] 袁锐,孙宇,范文海,等. 回转分级筛的动力学仿真研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(12): 52 - 55.
- [9] 邱明,廖振强,樊黎霞,等. 高方平筛动力学建模与有限元仿真[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2008, 32(4): 487 - 491.
- [10] SOLDINGER M. Interrelation of stratification and passage in the screening process[J]. Miner Eng, 1999, 12(5): 497 - 516.
- [11] SOLDINGER M. Transport velocity of a crushed rock material bed on a screen[J]. Miner Eng, 2002, 15(1/2): 7 - 17.
- [12] SINGH R. Vibratory separators still make the grade for screening dry bulk powders[J]. Filtr Sep, 2004, 41(1): 20 - 21.
- [13] 王中营,任宁,武文斌,等. TQLZ 型往复振动筛动力学模型与虚拟样机仿真[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 67 - 70.
- [14] LI Z, TONG X, ZHOU B, et al. Modeling and parameter optimization for the design of vibrating screens[J]. Miner Eng, 2015, 83: 149 - 155.
- [15] 邱明,廖振强,焦卫东,等. 基于刚柔耦合的高方平筛动力学建模与振动模态分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(24): 2960 - 2964, 2990.
- [16] XIAO J, TONG X. Characteristics and efficiency of a new vibrating screen with a swing trace [J]. Particuology, 2013, 11(5): 601 - 606.
- [17] ARIFUZZAMAN S M, DONG K, YU A. Process model of vibrating screen based on DEM and physics - informed machine learning[J/OL]. Powder Technol, 2022, 410: 117869[2023 - 07 - 19]. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117869>.
- [18] 荆海伟. 模块化高方平筛结构设计及其结构动力学分析[D]. 郑州:河南工业大学, 2011.
- [19] 张昊晨,张超,曹宪周,等. 基于 EDEM 的组合清理筛筛分仿真和性能分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(11): 147 - 152.