

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.016

三移动两转动振动筛驱动机构优化与试验

王立军 段良坤 郑招辉 崔友强 李义博 赵惠君

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为提高玉米脱出物在振动筛上的筛分效率,基于传统的平面往复振动筛,设计了一种玉米清选振动筛驱动机构,可使筛面实现3个移动2个转动;为深入研究其运动规律和筛分性能,用封闭矢量多边形法推导了筛面上任意一点的位移方程;以筛面后端振幅最小为目标,应用Isight软件优化各驱动杆件的长度,使筛面后端的振幅达到最小值15.4 mm;利用Matlab数值模拟确定筛面运动为非简谐周期运动。为确定驱动机构主轴转速和玉米脱出物摄入量对振动筛性能的影响,通过试验比较玉米籽粒在该机构筛面与平面往复振动筛面上的透筛率,试验结果表明,当玉米脱出物的喂入量为6 kg/s时,该机构主轴的最佳转速为260 r/min,玉米籽粒在该机构筛面上的透筛率比其在平面往复振动筛上的透筛率提高了5.75%,节省功耗16.1%。

关键词: 玉米清选; 振动筛驱动机构; 优化; 数值模拟; 非简谐运动

中图分类号: S225.5⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)06-0138-08

Optimization and Experiment on Driving Mechanism of Vibrating Screen with Three Translations and Two Rotations

WANG Lijun DUAN Liangkun ZHENG Zhaohui CUI Youqiang LI Yibo ZHAO Huijun

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Vibrating sieve for corn cleaning is a vital component of corn harvester. To further improve the screening efficiency of corn threshed mixture on the screen, a new type of driving mechanism of vibrating screen for corn cleaning was designed, in which three translations and two rotations of the screen can be realized based on the plane reciprocation mechanism with only two translation. To obtain the motion laws and screening performance of the screen, the displacement equation of any point on the screen were derived by using the closed vector polygon method. The lengths of each drive rod were determined by using optimal design of the software Isight. The optimization objective was that the displacement of the screen in the rear would be minimum. The back amplitudes of the screen optimized was 15.4 mm. Combining Matlab software, the results of numerical simulation showed that the motion of the mechanism was cyclical and not simply harmonic. Comparative experiment was conducted on the new type of driving mechanism and the plane reciprocation mechanism. Sieving rate of corn particles penetrated the sieve with high-speed camera was recorded, under the condition of different speeds of spindle and the mass of corn threshed mixture. In the experiments, the mass percentages of corn kernels, corn stalks, corncob and light mixture were 73.3%, 17.6%, 8.7% and 0.4%, respectively. The conclusion was drawn that the optimized speed of spindle was 260 r/min when the maximum feed mass was 6 kg/s. The corresponding sieving rate was increased by 5.75% and energy consumption was reduced by 16.1%. The superiority of this new organization was proven. The research result provided a theoretical basis for designing more reasonable cleaning mechanism to improve the production efficiency.

Key words: corn cleaning; driving mechanism of vibrating screen; optimization; numerical simulation; non-simple harmonic motion

收稿日期: 2017-11-21 修回日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475090)、黑龙江省高校新世纪优秀人才支持项目(1254-NCET-003)、黑龙江省科学基金项目(E2017004)和东北农业大学学术骨干计划项目

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

活动连杆(SS');后端V型杆(LKJ和PON)中部(K点和O点)分别与下导杆(GK和TO)和吊杆(MK和QO)铰接,两支杆分别连接上导杆(HL和RP)和活动连杆(JJ'和NN');4个活动连杆通过球铰(I'、J'、N'、S')和上筛(I'J'N'S')连接;吊杆铰接于机架上部。

1.1.2 工作原理

在电动机驱动下,偏心轮(AB和XY)分别带动连杆(BC和YW)使摇杆(CDG和WVT)摆动,使上筛面(I'J'N'S')实现沿x、y方向的移动。筛面前后的铰接固定端(M点与Q点、D点与V点)分居于筛面的上下两侧,因而能够实现筛面围绕z轴转动;机

构左右两侧限位杆(EF和UR)的铰接位置(E点和U点)的不对称布置,使筛面两侧导杆(RP与HL、GK与TO)在摇杆的牵引作用下不同步的摆动,进而实现筛面绕x轴转动;限制左侧活动连杆(IJ'和JJ')绕x轴转动自由度,而右侧(NN'和SS')不加限制,进而实现筛面沿z向移动,实现3个移动2个转动的运动形式。

1.2 运动学分析

机构的杆件相对较多且筛面是空间的运动,综合考虑筛面的运动学分析采用封闭矢量多边形法,鉴于机构左右两侧的牵连运动不同,两侧方程分别推导,机构简图如图2所示。

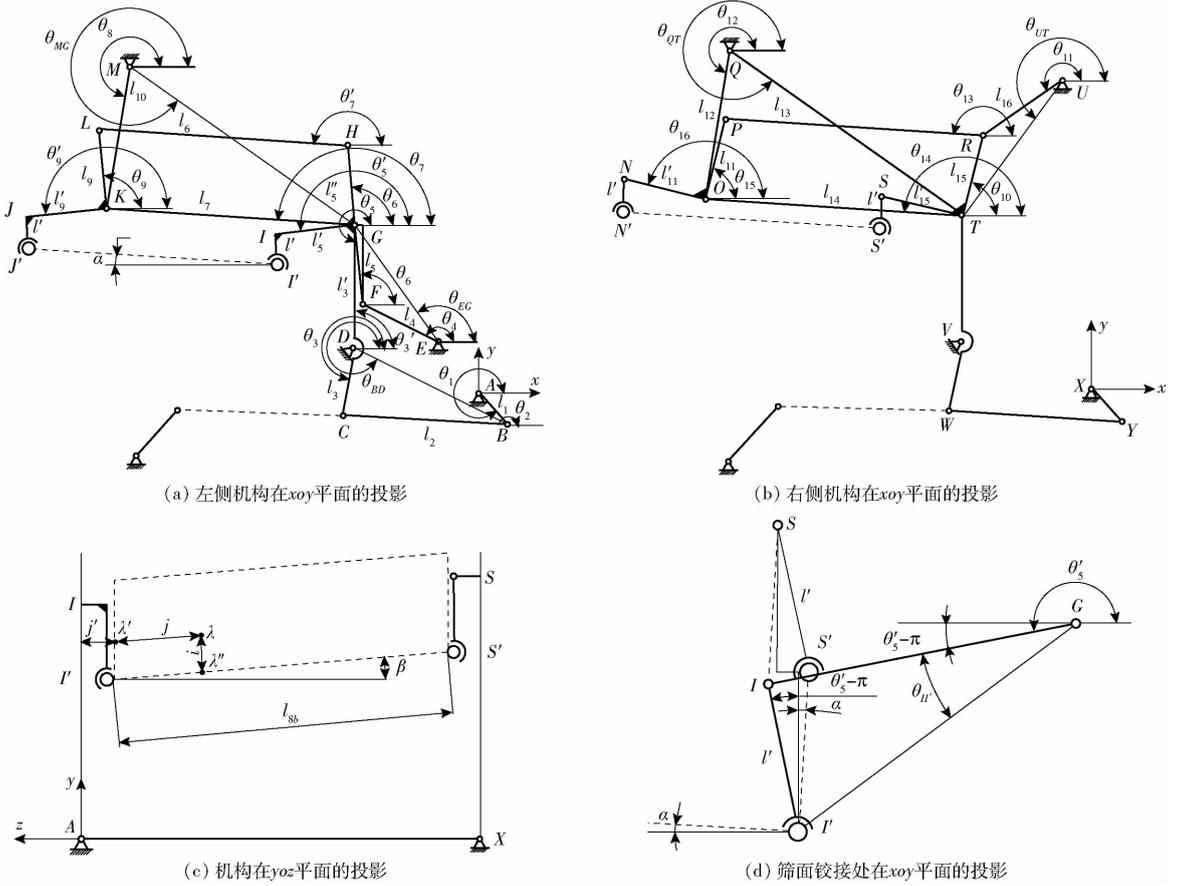


图2 机构运动简图

Fig. 2 Motion analysis sketches of mechanism

根据机构运动简图,作封闭矢量多边形 ABCD, 建立矢量方程如下

$$l_{AB} + l_{BC} = l_{AD} + l_{DC} \quad (1)$$

可得机构 B、C 点的位移方程为

$$\begin{cases} x_B = l_1 \cos\theta_1 \\ y_B = l_1 \sin\theta_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_C = x_B + l_2 \cos\theta_2 = x_D + l_3 \cos\theta_3 \\ y_C = y_B + l_2 \sin\theta_2 = y_D + l_3 \sin\theta_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 x_i, y_i ——机构上某点 i (铰接点或任意点 A, B, C...) 的 x, y 坐标, mm

l_j ——机构上 j 杆 ($j=1, 2, 3$) 的长度, mm

θ_k ——机构上 j 杆与 x 轴正向间的夹角, rad

设 BD 杆绕点 D 与 x 轴正向的角位移为 θ_{BD} , 则

$$\tan\theta_{BD} = \frac{y_D - y_B}{x_D - x_B} \quad (4)$$

则由余弦定理可得杆 CD 的角位移方程为

$$\cos(\theta_3 - \theta_{BD}) = \frac{(x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3 \sqrt{(x_D - x_B)^2 + (y_D - y_B)^2}} \quad (5)$$

BC 杆的角位移方程为

$$\tan\theta_2 = \frac{y_B - y_C}{x_B - x_C} \quad (6)$$

机构运动仿真可得 $\theta_3 \in (\pi, 2\pi)$; $(\theta_{BD} - \theta_3) \in (0, \pi)$ 。

由矢量多边形 GK 可得矢量方程

$$\mathbf{l}_{GK} = \mathbf{l}_{GM} + \mathbf{l}_{MK} \quad (7)$$

可得机构 G 、 K 点的位移方程为

$$\begin{cases} x_G = x_D + l'_3 \cos\theta'_3 \\ y_G = y_D + l'_3 \sin\theta'_3 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_K = x_G + l_7 \cos\theta_7 = x_M + l_{10} \cos\theta_8 \\ y_K = y_G + l_7 \sin\theta_7 = y_M + l_{10} \sin\theta_8 \end{cases} \quad (9)$$

式中 l'_j ——机构上与 j 杆 ($j=1, 2, \dots$) 等长或为同一杆件的长度, mm

θ'_k ——机构上与 j 杆等长或为同一杆件与 x 轴正向间的夹角, rad

设 MG 杆绕点 M 与 x 轴正向的角位移为 θ_{MG} , 则

$$\tan\theta_{MG} = \frac{y_G - y_M}{x_G - x_M} \quad (10)$$

由余弦定理可得 MK 杆的角位移方程为

$$\cos(\theta_{MG} - \theta_8) = \frac{(x_M - x_G)^2 + (y_M - y_G)^2 + l_{10}^2 - l_7^2}{2l_{10} \sqrt{(x_M - x_G)^2 + (y_M - y_G)^2}} \quad (11)$$

可得 GK 杆的角位移方程为

$$\tan\theta_7 = \frac{y_K - y_G}{x_K - x_G} \quad (12)$$

机构运动仿真可得: $\theta_7 \in (0, \pi)$; $(\theta_{MG} - \theta_8) \in (0, \pi)$ 。

则筛面在 xoy 平面内的倾角为

$$\alpha = \pi - \theta_7 \quad (13)$$

活动连杆 II' 与 x 轴正向夹角为

$$\theta_{II'} = \arctan \frac{l'}{l'_5} \quad (14)$$

GI' 间的距离为

$$l'' = \sqrt{l'^2 + l_5'^2} \quad (15)$$

机构 I' 、 J' 点位移方程为

$$\begin{cases} x_{I'} = x_G + l'' \cos(\theta'_5 + \theta_{II'}) = x_G + l'' \sin(\theta_5 + \theta_{II'}) \\ y_{I'} = y_G + l'' \sin(\theta'_5 + \theta_{II'}) = y_G - l'' \cos(\theta_5 + \theta_{II'}) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_{J'} = x_K + l'' \cos(\theta'_9 + \theta_{II'}) = x_K + l'' \sin(\theta_5 + \theta_{II'}) \\ y_{J'} = y_K + l'' \sin(\theta'_9 + \theta_{II'}) = y_K - l'' \cos(\theta_5 + \theta_{II'}) \end{cases} \quad (17)$$

同理根据图 2b 可推导机构右侧的 Y 、 W 、 T 、 S 点的位移方程, 结合图 2c、2d 可得 S' 点的位移方程为

$$\begin{cases} x_{S'} = x_S + l' \sin(\theta'_5 - \pi) = x_S + l' \sin\left(\theta_5 - \frac{3\pi}{2}\right) \\ y_{S'} = y_S - l' \cos(\theta'_5 - \pi) = y_S - l' \sin\left(\theta_5 - \frac{3\pi}{2}\right) = \\ \quad y_{I'} + l_{8b} \sin\beta \\ z_{S'} = z_{I'} - l_{8b} \cos\beta \end{cases} \quad (18)$$

式中 l_{8b} ——筛面宽度, mm

z_i ——机构上某点 i (铰接点或任意点 $A, B, C \dots$) 的 z 坐标, mm

由式 (18) 可得, 筛面 $I'S'$ 在 yoz 平面内的角位移方程为

$$\sin\beta = \frac{y_S - y_{I'} + l' \sin\theta}{l_{8b}} \quad (19)$$

式中 β ——筛面在 yoz 平面内的倾角, rad

距离筛面前端为 i 的直线上的任意一点 λ' 位移方程为

$$\begin{cases} x_{\lambda'} = x_{I'} + i \cos\theta_7 \\ y_{\lambda'} = y_{I'} + i \sin\theta_7 \\ z_{\lambda'} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

距离筛面左侧为 j 的直线上的任意一点 λ'' 位移方程为

$$\begin{cases} x_{\lambda''} = x_{I'} - j \sin\beta \tan\theta_7 \\ y_{\lambda''} = y_{I'} + j \sin\beta \\ z_{\lambda''} = z_{I'} - j \cos\beta \end{cases} \quad (21)$$

筛面上的任意一点 λ 位移方程为

$$\begin{cases} x_{\lambda} = x_{\lambda'} + j \sin\beta \tan\alpha = x_{\lambda''} - j \sin\beta \tan\theta_7 \\ y_{\lambda} = y_{\lambda'} + i \sin\alpha = y_{\lambda''} + i \sin\theta_7 \\ z_{\lambda} = z_{\lambda''} \end{cases} \quad (22)$$

将式 (22) 对时间 t 求导可得到筛面上任意一点的速度和加速度方程。

2 机构的参数优化

采用 Matlab 编程和优化软件 Isight 序列二次规划算法联合进行参数优化。

2.1 设计变量

振幅对筛面工作性能的影响较为显著^[12]。通过 CATIA 仿真分析, 本设计选取对传动性能影响较大的曲柄长度 l_1 、连杆长度 l_2 、摇杆长度 l_3 和 l'_3 、限位杆长度 l_4 和 l_{16} 、T 型杆长度 l_5 和 V 型杆长度 l_9 为变量进行参数优化。设计变量 \mathbf{X} 可表示为

$$\mathbf{X} = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l'_3 \quad l_4 \quad l_{16} \quad l_5 \quad l_9] = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_6] \quad (23)$$

2.2 目标函数

筛面振动的频率不变时, 若筛面振幅过大, 虽然

便于物料的分散,但是减少了物料与筛面的接触时间,增加筛面对各杆件的冲击力;若筛面振幅过小,虽然增加了物料与筛面接触的时间,但是会导致物料的堆积,同样限制筛分性能。理想的筛面运动是筛面前端的纵向位移大于后端,这有利于物料整体向后推进和保证脱出物的分离。数值模拟发现筛面前端的纵向位移大于后端,因此使筛面后端的纵向位移达到最小可很好地实现物料筛分。在筛面的运动学方程的基础上,以振动筛后端振幅最小为优化目标^[12],建立其目标函数为

$$\min F(\mathbf{X}) = \max y_A(t) - \frac{\max y_A(t) + \min y_A(t)}{2} \quad (24)$$

2.3 约束条件

杆件的长度取值范围满足曲柄和摇杆存在的条件,使筛面振幅控制在 20 mm 内,筛面前后倾角 α 应小于筛面与物料颗粒的摩擦角^[20],筛面前后倾角 α 控制在 $3^\circ \sim 6^\circ$,同时保证振动筛运动仿真无死点、卡顿及优化收敛,适当缩小边界范围并取整,最终确定杆件的取值范围。筛面左右倾角 β 过大会造成籽粒侧堆积,倾角太小又不能很好地实现筛分,因此选取 β 的取值范围为 $1^\circ \sim 6^\circ$,各杆件取值范围如表 1 所示。

表 1 变量范围

变量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
取值下限	15	300	120	150	180	80
设计尺寸	20	316	149	154	204	83
取值上限	25	330	150	180	220	100

2.4 优化分析

在 Isight 软件的 Design Gateway 的主菜单中建立 Matlab 组件的优化模型,优化命令以运动学方程为基础,设定各个设计变量的取值范围,建立目标函数与约束函数,并将各个设计变量、目标函数和约束函数联系起来。设定序列二次规划算法的优化参数,对设计模型进行优化。优化结果如表 2 所示,筛面后端最大位移由起初 21.3 mm 收敛为 15.4 mm,减少了 5.9 mm。优化后筛面的安装倾角为 3.85° ,筛面左右摆动的最大倾角为 1.8° 。

表 2 优化结果

Tab. 2 Results of optimization

杆件长度/mm						筛面倾角/($^\circ$)	
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	α	β
15	330	150	150	180	89	3.85	1.80

3 筛面运动的数值模拟与分析

将筛面的运动方程导入到 Matlab 中,数值模拟筛面上点和线的运动规律。考虑到筛面的运动是周期性的,选择筛面两个周期的运动进行分析,设置的数值模拟时间为 1.2 s,曲柄输入转速选为 100 r/min,三移动两转动振动筛各杆件的数值模拟参数如表 2 所示,筛面取点和线如图 3 所示,在 xoz 平面上取筛面的铰接点 A、F,鉴于其运动形式对筛面的运动规律有直接影响;选取代表性的直线 BC、BE,因为筛面上与 BC、BE 平行的所有直线除了位移幅值和初始相位不同外,运动规律类似。

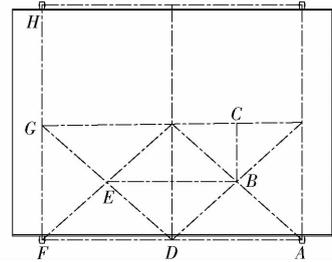


图 3 筛面取点和线

Fig. 3 Points and lines in screen

筛面倾角是影响筛面筛分性能的重要参数之一^[17-18],在传统的平面往复振动筛运动分析当中,一般将筛面的运动简化为一个点的简谐运动,认为筛面倾角是固定不变的,即认为安装倾角等于筛面倾角,由图 4a 可得,在 xoy 平面内筛面倾角 α 在 $3.85^\circ \sim 4.24^\circ$ 范围内变化,而非固定不变,即把筛面的运动简化为一个点的运动是不准确的,筛面的运动是非简谐运动(筛面倾角的小幅变动是振动筛运动自由度之一)。筛面左右摆动倾角 β 也是一自由度,其在 $yozy$ 平面内呈周期性变化,其值浮动范围为 $\pm 1.8^\circ$,作业时此角度的变化使筛面沿 z 向产生移动,此运动形式能够使物料产生侧向的滑动,提高物料的分散性能。筛面两个转动的叠加使筛面产生非简谐的周期运动,使得物料在筛面上各点的速度和加速度各不相同,便于物料的分散、分层与透筛,提高筛分效率。

由图 4c、4f 可得,筛面后端 x 向位移比前端高 4.6 mm,利于玉米籽粒与杂余的分离。如图 4d、4g 所示,筛面 y 向位移沿着与 BE 平行的中线呈周期性变化,优化后筛面前后端的位移如图 4b 所示,筛面前端振幅高出后端 7.6 mm,利于物料整体向后推进和玉米籽粒与杂余的分离。如图 4e、4h 所示,筛面 z 向的位移呈简谐运动规律,这有利于减少物料的侧堆积。筛面上点的合加速度变化如图 4i、4j 所示,筛面前端合加速度大于后端,加速度的变化直接

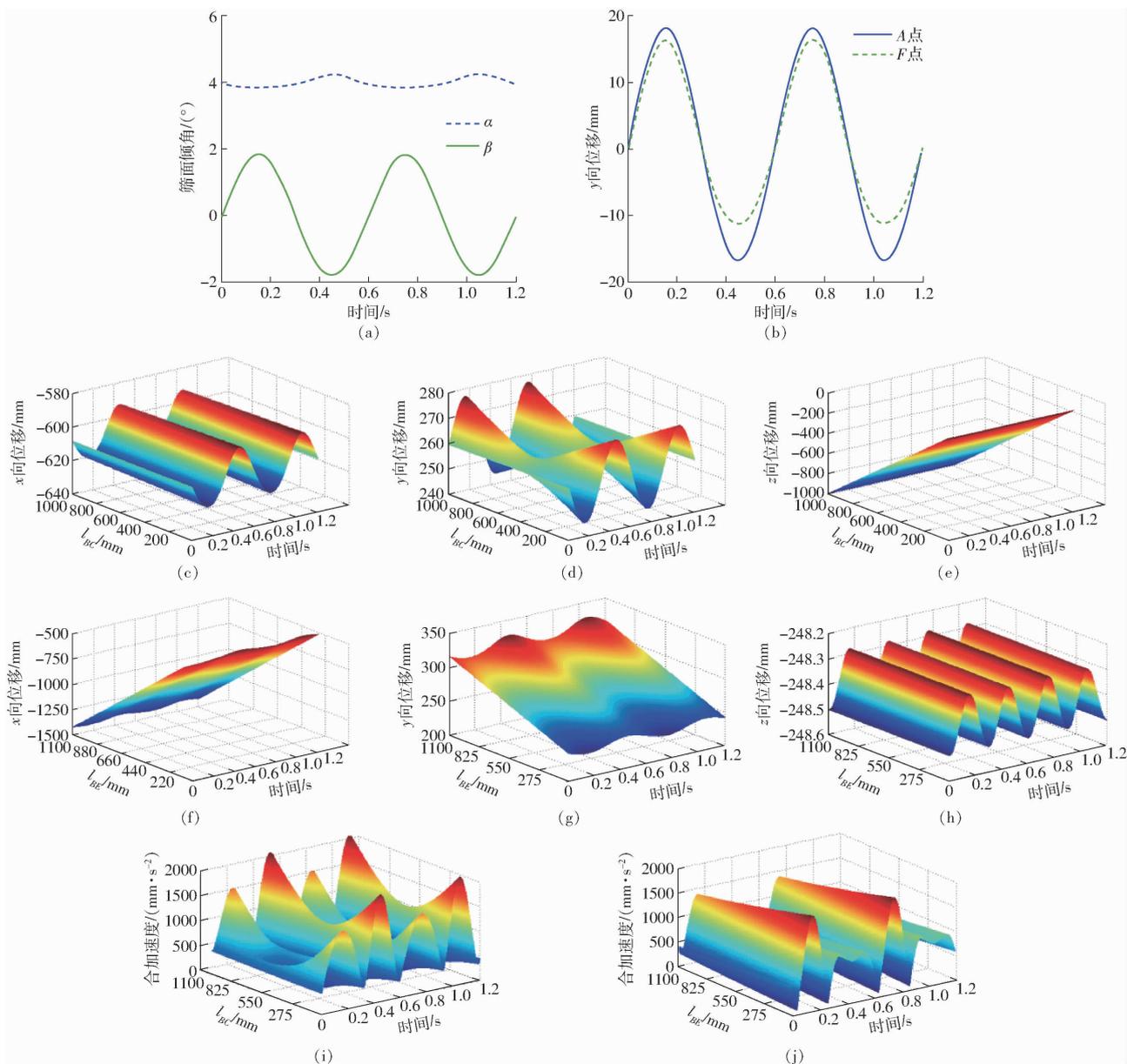


图 4 筛面上 A、F 点及直线 BC、BE 的运动学分析

Fig. 4 Kinematic analysis of points A and F and lines BC and BE in screen

影响物料在筛面上的分散、分层以及透筛时间,其数值的非简谐变化规律同样印证筛面的运动形式是非简谐的。

4 试验验证

4.1 试验物料

用电子秤(ACS-100kg型)从德美亚一号玉米脱出物中分别称取样品 10、20、30 kg(玉米籽粒、玉米茎秆、玉米芯、轻质杂余的质量百分数分别为 73.3%、17.6%、8.7%、0.4%)。

4.2 试验仪器及装置

为获取在不同玉米脱出物喂入量下三移动两转动振动筛驱动机构主轴的最佳转速,用转速表(SW-6234C型)标定主轴转速,通过调节变频器

(6ES6430-2UD27-5CA0型)频率改变主轴转速。料斗的开口高度可调,通过标定其开口高度实现脱出物不同的喂入量。试验筛面采用圆孔筛(孔径、筛孔纵向和横向间距分别为 15、20、17.5 mm),试验台架如图 5 所示。

4.3 试验方法

鉴于两机构的下筛面运动规律一致,因此只对上筛面做性能对比试验。接通电源并将变频器频率调节到标定值后启动电动机,在振动筛运行平稳后,打开料斗到标定高度,玉米脱出物经过 5 s 连续喂入后,同时关闭电动机和料斗开口,称取筛下玉米籽粒质量,重复试验 5 次。

4.4 试验结果

玉米籽粒在两上筛面上的透筛率(给定时间内



(a) 三移动两转动振动筛驱动机构试验装置



(b) 平面往复振动筛试验装置

图5 试验台架

Fig.5 Test devices

1. 可调料斗 2. 三移动两转动振动筛驱动机构 3. 电动机
4. 转速表 5. 变频器

玉米脱出物一定喂入量下玉米籽粒通过筛面的质量百分比)如图6所示。

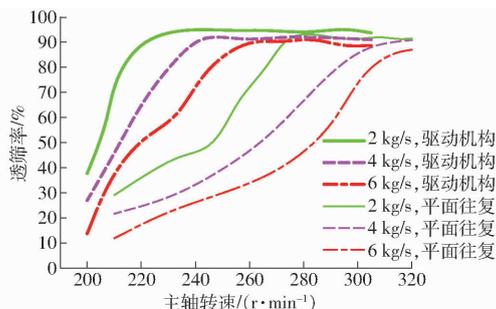


图6 主轴转速对透筛率的影响

Fig.6 Effects of spindle speed on sieving rate

由图6可知,三移动两转动振动筛驱动机构在玉米脱出物喂入量为2、4、6 kg/s时,透筛率分别达到95%、93%、92%时趋于平缓,所对应的主轴最佳转速分别为230、240、260 r/min。相同条件下,平面往复振动筛上玉米籽粒的透筛率分别在93%、89%、87%时趋于平缓,不同脱出物喂入量的最佳转速分别为270、300、310 r/min。

三移动两转动振动筛驱动机构和平面往复振动筛串联的传动件相同,假设其工作负荷和机械效率

相同,在相同工作时间内电动机功耗^[21]为

$$W = \frac{Tnt}{9550\eta} \quad (25)$$

式中 W ——驱动机构电动机所做的功,J

t ——电动机工作时间,s

T ——电动机扭矩,N·m

n ——电动机转速,r/min

η ——传动系统总效率

节省功耗百分比为

$$\xi = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\% \quad (26)$$

式中 W_1 、 W_2 ——平面往复振动筛和三移动两转动振动筛驱动机构电动机所做的功,J

n_1 、 n_2 ——平面往复振动筛和三移动两转动振动筛驱动机构电动机转速,r/min

ξ ——节省功耗百分比,%

通过计算对比两机构的透筛率和节省功耗百分比可得,玉米脱出物喂入量为2、4、6 kg/s时,玉米籽粒在三移动两转动振动筛驱动机构筛面上的透筛率比在平面往复振动筛面上分别提高了2.15%、4.50%、5.75%,相同条件下节省功耗百分比分别为14.8%、20.0%、16.1%。

5 结论

(1) 基于机构运动仿真获得三移动两转动振动筛驱动机构各杆件角位移范围,用封闭矢量多边形法得出筛面上任意一点的位移方程。

(2) 通过对振动筛驱动机构的优化,使筛面后端的 y 向振幅达到最小,为15.4 mm,有利于提高玉米籽粒的透筛效率。

(3) 基于筛面的运动学方程,通过数值模拟确定其运动规律为非简谐周期运动。

(4) 玉米脱出物喂入量达到6 kg/s时,玉米籽粒的透筛率最大为92%,三移动两转动振动筛驱动机构主轴的最佳转速为260 r/min,玉米籽粒在三移动两转动振动筛驱动机构筛面上的透筛率比其在平面往复振动筛面上的透筛率提高了5.75%。

参 考 文 献

- 孙进良,刘师多,丁慧玲. 我国玉米收获机械化的应用现状与展望[J]. 农机化研究,2009,31(3):217-219.
SUN Jinliang, LIU Shiduo, DING Huiling. Actuality and expectation of domestic corn harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(3): 217-219. (in Chinese)
- 耿爱军,杨建宁,张兆磊,等. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究,2016,38(4):251-257.
GENG Aijun, YANG Jianing, ZHANG Zhaolei, et al. Discuss about the current situation and future of corn harvest machinery about domestic and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 251-257. (in Chinese)
- 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.
- 4 李菊, 曾氙菲, 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 399 - 407. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161154&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.054.
LI Ju, ZENG Qingfei, DENG Jiaming, et al. Screening process analysis for multi-dimensional parallel vibrating screen and optimization of screen surface movement [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 399 - 407. (in Chinese)
 - 5 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)
 - 6 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)
 - 7 王成军, 李耀明, 马履中, 等. 3自由度混联振动筛设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 69 - 73.
WANG Chengjun, LI Yaoming, MA Lüzhong, et al. Design of three degree of freedom hybrid vibration screen [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 69 - 73. (in Chinese)
 - 8 刘剑敏, 马履中, 许子红, 等. 振动筛两平移两转动并联机构的运动学分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 59 - 62.
LIU Jianmin, MA Lüzhong, XU Zihong, et al. Kinematical analysis of vibrating screen on a kind of 2T-2R parallel mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 59 - 62. (in Chinese)
 - 9 李耀明, 王智华, 徐立章, 等. 油菜脱出物振动筛分运动分析及试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 111 - 114.
LI Yaoming, WANG Zhihua, XU Lizhang, et al. Motion analysis and experimental research of rape extraction vibration sieve [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 111 - 114. (in Chinese)
 - 10 李耀明, 董钢, 徐立章. 油菜籽透筛过程的仿真试验与分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(9): 189 - 191.
 - 11 王立军, 张传根, 丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 108 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.016.
WANG Lijun, ZHANG Chuangen, DING Zhenjun. Structure optimization of cleaning screen for maize harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 108 - 114. (in Chinese)
 - 12 李杰, 闫楚良, 杨方飞. 联合收割机振动筛的动态仿真与参数优化[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(5): 701 - 704.
LI Jie, YAN Chuliang, YANG Fangfei. Dynamic simulation and parameter optimization of the combine harvester vibration sieve [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(5): 701 - 704. (in Chinese)
 - 13 陈翠英, 王志华, 李青林. 油菜脱出物物理机械特性及振动筛参数优化[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 60 - 63, 70.
CHEN Cuiying, WANG Zhihua, LI Qinglin. Mechanophysical properties of rape extractives and parametrical optimization of vibration sieve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 60 - 63, 70. (in Chinese)
 - 14 王志华, 陈翠英. 基于ADAMS的联合收割机振动筛虚拟设计[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 53 - 56.
WANG Zhihua, CHEN Cuiying. Virtual design of vibrating sieve of combine harvester based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 53 - 56. (in Chinese)
 - 15 韩林君, 刘剑雄, 王远富. 基于MATLAB的某型号振动筛设计参数的优化[J]. 矿山机械, 2015, 43(3): 95 - 98.
HAN Linjun, LIU Jianxiong, WANG Yuanfu. Optimization on design parameters of a vibratory screen based on MATLAB [J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(3): 95 - 98. (in Chinese)
 - 16 LEE H, CHO H, KWON J. Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill [J]. Powder Technology, 2010, 198(3): 364 - 372.
 - 17 DONG K J, YU A B. Numerical simulation of the particle flow and sieving behavior on sieve bend/low head screen combination [J]. Minerals Engineering, 2012, 31: 2 - 9.
 - 18 WANG G, TONG X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation [J]. Mining Science and Technology (China), 2011, 21(3): 451 - 455.
 - 19 LI Aimin, LÜ Ruiling, LIU C S. A virtual test of screening technology based on the AGEIA PhysX [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2008, 18(2): 300 - 304.
 - 20 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 199 - 200.
 - 21 刘莹, 吴宗泽. 机械设计教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 49 - 52.
 - 22 JIANG H, ZHAO Y, DUAN C, et al. Kinematics of variable-amplitude screen and analysis of particle behavior during the process of coal screening [J]. Powder Technology, 2016, 306: 88 - 95.
 - 23 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)