

振动整流式颗粒饲料尺寸检测仪设计与试验

牛智有^{1,2} 杨天圆¹ 李洪成³ 孔宪锐¹ 曾荣¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部智慧养殖技术重点实验室, 武汉 430070;

3. 厦门海洋职业技术学院, 厦门 361100)

摘要: 针对颗粒饲料尺寸检测操作繁琐, 自动化水平低的实际问题, 为了实现颗粒饲料尺寸的自动测量, 设计了基于图像处理技术的振动整流式颗粒饲料尺寸检测仪。利用离散元软件 Rocky Dem 建立颗粒饲料-槽型整流板相互作用的仿真模型, 以槽型整流板的振幅、振动频率、安装倾角和滑槽转向系数为试验因素, 颗粒饲料滑移均速和滑移速度变异系数为评价指标, 通过单因素仿真试验, 分析颗粒饲料在槽型整流板滑槽内的滑移运动特性, 结果表明, 影响颗粒饲料滑移运动特性的主要因素为振幅、振动频率及安装倾角。采用正交组合仿真试验, 建立各试验因素与评价指标间的数学模型, 并对模型进行参数优化, 当槽型整流板安装倾角为 6.33° 、振动频率为 101.49 Hz、振幅为 0.50 mm 时, 颗粒饲料的滑移均速和滑移速度变异系数综合最优, 分别为 0.31 m/s 和 4.10%。分别采集环模孔径为 3、4、5 mm 的颗粒饲料, 对检测仪的测量精度进行验证, 通过与人工测量相比较, 检测仪对颗粒饲料直径自动测量结果平均绝对误差分别为 0.048、0.020、0.012 mm; 颗粒饲料长度自动测量结果平均绝对误差分别为 0.164、0.162、0.103 mm。研究结果表明, 所设计的颗粒饲料尺寸检测仪具有良好的准确性和可靠性, 满足实际生产检测需求。

关键词: 颗粒饲料; 尺寸检测仪; 振动整流; 图像处理; 仿真优化

中图分类号: S220.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0410-12

OSID:



Design and Experiment of Vibratory Rectification-based Particle Feed Size Detection Device

NIU Zhiyou^{1,2} YANG Tianyuan¹ LI Hongcheng³ KONG Xianrui¹ ZENG Rong¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Smart Farming for Agricultural Animals, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

3. Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361100, China)

Abstract: In response to the practical issues of labor-intensive and low automation levels in particle feed size detection, a vibratory rectification-based particle feed size detection device was designed by using image processing technology. A simulation model of the interaction between the particle feed and the chute-type rectification plate was established by using the discrete element method software Rocky Dem. The amplitude, vibration frequency, installation angle, and chute deflection coefficient of the rectification plate were considered as experimental factors, while the average slip velocity and coefficient of slip velocity variation of the particle feed were used as evaluation indicators. Through single-factor simulation experiments, the slip motion characteristics of the particle feed within the chute-type rectification plate were analyzed. The results showed that the main factors influencing the particle feed's slip motion characteristics were the amplitude, vibration frequency, and installation angle. Orthogonal combination simulation experiments were conducted to establish mathematical models between the experimental factors and evaluation indicators, followed by parameter optimization of the models. The optimal configuration was found to be an installation angle of 6.33° , a vibration frequency of 101.49 Hz, and an amplitude of 0.50 mm. Under these conditions, the particle feed achieved the best overall performance with an average slip velocity of 0.31 m/s and a coefficient of slip velocity variation of 4.10%. Particle feed samples with aperture sizes of 3 mm, 4 mm, and 5 mm were collected to validate the measurement

accuracy of the detection device. Compared with manual measurements, the average absolute errors (MAE) of the automatic diameter measurements were 0.048 mm, 0.020 mm, and 0.012 mm, respectively. The MAE of the automatic length measurements were 0.164 mm, 0.162 mm, and 0.103 mm, respectively. The research results demonstrated that the designed particle feed size detection device exhibited good accuracy and reliability, meeting the requirements of practical production inspection.

Key words: particle feed; size detection device; vibration rectification; image processing; simulation and optimization

0 引言

随着饲料行业的迅速发展,颗粒饲料以营养均衡、适口性好、易包装运输等诸多优点在饲料生产领域中所占比重越来越大^[1-3]。颗粒饲料成品尺寸对饲料的产品质量、后续加工工艺流程设计及畜禽生产性能均产生重要影响^[4-5]。目前颗粒饲料尺寸的测定主要采用 ANSI/ASAE S319.4 方法^[6],使用 14 层标准筛在振筛机上对饲料样品进行筛分,进而求出颗粒饲料样品的几何平均尺寸。上述方法操作繁琐,自动化水平低,极易受测量人员感官标准不一及筛网磨损等因素影响,系统误差大,已经不能满足现代饲料工业的发展需求。

振动送料技术作为近些年迅速发展起来的一种物料整理输送技术^[7],早期广泛应用于机械制造业及食品医药领域行业生产中微量物料的输送计量之中^[8]。近些年随着农业工程领域对排种精准度、物料输送离散性等工况标准要求提高,国内相关研究学者对振动送料技术应用于农业领域已取得诸多成果。文献[9]通过离散元法研究了水稻颗粒在风筛式清选装置中直线振动特性,分析了振动参数对水稻颗粒筛分效率的影响,并通过试验验证了 EDEM 模拟的可行性。文献[10]在振动输送机设计中考虑倾角参数,可有效地提高物料的输送效率。文献[11]基于电磁振动送料原理,设计了一种实现玉米籽粒定向排列输送试验装置。文献[12]通过分析超级稻稻种的几何物理特性,提出利用导向板使稻种在振动式排种器上沿稻种长轴按胚胎方向有序排列,从而实现超级杂交稻定向播种。

为提高物料物理特征参数测量的准确性、高效性及自动化程度,将机器视觉技术应用于颗粒尺寸测量已取得了诸多成果^[13-19]。文献[20]利用扫描电子显微镜获取颗粒图像,经图像分析软件进行相关图像处理,从而输出颗粒样本的数量-粒度相关关系曲线等。文献[21]设计了一种基于线阵相机采集与传送带同步传输相结合的扫描检测装置,实现颗粒饲料的粒度分析,与人工测量相比,检测装置对饲料颗粒粒度分布区间的平均绝对误差和最大相对

偏差为 0.63% 和 2.62%。文献[22]搭建了一种基于双目线阵相机的复合肥颗粒检测系统,能够在高粉尘、强腐蚀作业环境下进行大样本颗粒粒度检测,试验表明,该检测系统误差在 $\pm 3\%$ 范围内。文献[23]提出了基于机器视觉的毫米级煤研石颗粒的粒度检测方法,并开发了相应的燃料粒度在线检测系统应用于实际工业生产中。文献[24]提出了一种基于傅里叶级数的分割算法,能够对粘连农作物颗粒进行图像分析。

为了避免颗粒饲料尺寸检测过程出现颗粒重叠、侧滑现象,简化尺寸检测系统结构,提高算法普适性,本文利用电磁振动整流原理和机器视觉技术,设计一种颗粒饲料尺寸检测仪,利用离散元法及 Box - Behnken 试验对检测仪工作参数进行优化,使用高速工业相机结合图像处理技术获取颗粒饲料长度、直径信息,并通过试验验证自动检测仪的测量精度,以期为实现颗粒饲料尺寸的自动检测提供一种新方法和技术支撑。

1 尺寸检测仪结构与原理

1.1 尺寸检测仪结构

颗粒饲料尺寸自动检测仪结构示意图如图 1 所示。该装置主要由下料箱、槽型整流板、SDVC31 - L 型直线电磁振动器、图像采集部件、接料盒及 PC 机组成。直线电磁振动器、工业相机、条形 LED 光源等内部组件主要由内六角螺母安装固定于铝型材机架架上,直线电磁振动器与工业相机拍摄平面平行安装。

1.2 工作原理

工作时,下料箱内槽轮在调速电机带动下缓慢旋转,使下料箱内颗粒饲料下落在槽型整流板上,槽型整流板前端开设有分流板对颗粒饲料进行分流,后端开设有整流槽供颗粒饲料滑动;在直线电磁振动器激励及分流板分流作用下,到达各整流槽入口处的饲料颗粒均为沿轴向排列且保持一定间隔的单列颗粒流,并在整流槽约束作用下,保持稳定滑动而不跳动的运动状态向后方图像采集区域滑移;工业相机对进入图像采集区域的颗粒饲料进行图像拍

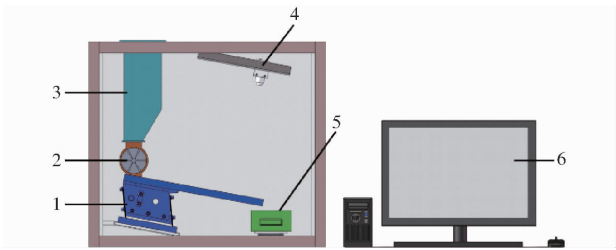


图 1 颗粒饲料尺寸自动检测仪结构图
Fig. 1 Structure diagram of automatic size detector

1. 直线电磁振动器及槽型整流板 2. 调速电机及槽轮 3. 下料箱 4. 图像采集部件 5. 接料盒 6. PC 机

摄,后期调用 Python 编程语言中的 Open CV 算法库函数,经过图像处理操作后在 PC 机上自动输出检测颗粒饲料的长度、直径等尺寸信息。

2 颗粒饲料振动滑移运动特性与受力分析

2.1 颗粒饲料受力分析

直线电磁振动器作为振动源驱动槽型整流板做往复振动,颗粒饲料在整流槽内存在静止、正向滑移、反向滑移及抛掷 4 种运动状态,颗粒饲料的运动状态主要取决于其受力情况。以颗粒饲料质心为原点建立坐标系,构建颗粒饲料的力学模型并对其受力情况展开理论分析,如图 2 所示。颗粒饲料在整流槽内主要受到重力 G 、支撑力 F_N 、摩擦力 F_f 作用,在颗粒饲料与整流槽间保持相对静止时,根据达朗贝尔原理,颗粒饲料还受到与振动器激励力相同方向的惯性力 F_g 。

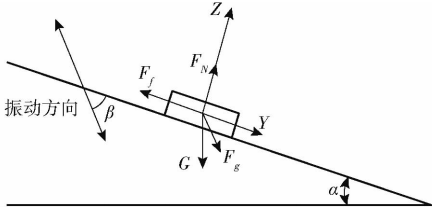


图 2 颗粒饲料在整流槽内受力分析

Fig. 2 Force analysis of feed particles in rectifying chute

颗粒饲料沿整流槽 Y 轴方向开始滑移瞬间应满足

$$G\sin\alpha - F_g\cos\beta \pm F_f = 0 \tag{1}$$

$$F_N - F_g\sin\beta - G\cos\alpha = 0 \tag{2}$$

其中 $F_f = F_N\tan\mu$ (3)

$$F_g = ma \tag{4}$$

式中 μ ——颗粒饲料相对槽型整流板面静滑动摩擦角, ($^\circ$)

α ——槽型整流板安装倾角, ($^\circ$)

β ——电磁振动器振动方向角, ($^\circ$)

a ——槽型整流板运动加速度, mm/s^2

m ——颗粒饲料质量, g

当颗粒饲料沿 Y 轴正向滑移时,式(1)中“ $\pm$ ”

取“ $-$ ”,当颗粒饲料沿 Y 轴反向滑移时,式(1)中“ $\pm$ ”取“ $+$ ”。

2.2 颗粒饲料运动特性分析

通过对颗粒饲料在槽型整流板上受力分析,确定槽型整流板在直线电磁振动器激励下运动方程为

$$S = A\sin(\omega t) \tag{5}$$

式中 S ——槽型整流板位移, mm

A ——振动器振幅, mm

ω ——直线电磁振动器角频率, rad/s

颗粒饲料在整流槽 Y 轴和 Z 轴方向上速度计算公式为

$$v_y = A\omega\sin(\omega t)\cos\beta \tag{6}$$

$$v_z = A\omega\sin(\omega t)\sin\beta \tag{7}$$

则颗粒饲料在整流槽 Y 轴和 Z 轴方向上加速度计算公式为

$$a_y = -A\omega^2\sin(\omega t)\cos\beta \tag{8}$$

$$a_z = -A\omega^2\sin(\omega t)\sin\beta \tag{9}$$

式(8)、(9)代入式(1)中可知,当颗粒饲料沿整流槽 Y 轴正向滑移时其运动特性满足

$$\frac{A\omega^2}{g}\sin(\omega t) = \frac{\cos\alpha\sin\mu - \sin\alpha\cos\mu}{\cos\mu\cos\beta + \sin\beta\sin\mu} \tag{10}$$

式中 g ——重力加速度, mm/s^2

正向滑移指数 D_k 计算公式为

$$D_k = k \frac{\cos(\mu - \beta)}{\sin(\mu - \alpha)} \tag{11}$$

其中 $k = \frac{A\omega^2}{g}$ (12)

反向滑移起始角 ϕ_{q0} 计算公式为

$$\phi_{q0} = \arcsin\left(-\frac{1}{D_q}\right) \tag{13}$$

其中 $D_q = k \frac{\cos(\mu + \beta)}{\sin(\mu + \alpha)}$ (14)

直线电磁振动器振动方向角满足

$$\beta = \arctan \frac{1 - C}{(1 + C)\tan\mu} \tag{15}$$

其中 $C = \frac{D_k\sin(\mu + \alpha)}{D_q\cos(\mu - \alpha)}$ (16)

颗粒饲料在整流槽内出现抛掷运动瞬间相位角 ϕ_d 计算公式为

$$\phi_d = \arcsin \frac{1}{D} \tag{17}$$

其中 $D = k \frac{\sin\beta}{\cos\alpha} < 1$ (18)

因此,颗粒饲料避免出现抛掷运动的条件为

$$\frac{A\omega^2}{g} \frac{\sin\beta}{\cos\alpha} < 1 \tag{19}$$

参考振动给料机使用情况分析^[25],为使颗粒饲料在整流槽内产生较大正向滑移运动状态,通常正

向滑移指数 D_k 取 2 ~ 3, 反向滑移指数 D_q 取 1。式(11)、(12)、(14)表明,在 μ 、 α 、 β 一定条件下,颗粒饲料正向滑移指数 D_k 和反向滑移指数 D_q 与直线电磁振动器振动角频率 ω 、振幅 A 有关, D_k 和 D_q 随 ω 、 A 的增加而增大,当 D_k 和 D_q 确定时 ω 和 A 也随之确定。增大 ω 和 A 可使颗粒相对有较好的正面滑动,但过大的 ω 和 A 会破坏颗粒饲料在槽型整流板滑槽内的稳定滑移运动状态,导致抛掷运动。

由以上分析可知,影响颗粒饲料沿整流槽滑移运动特性的主要因素包括直线电磁振动器振动频率、振幅及安装倾角。为了确保颗粒饲料滑移运动的稳定性,开展颗粒饲料运动仿真与工作参数优化十分必要。

3 颗粒饲料运动仿真与工作参数优化

3.1 颗粒饲料模型及物料接触参数设置

在 Solidworks 软件中建立槽型整流板及颗粒饲料几何模型。以环模孔径为 4 mm 的圆柱形颗粒饲料为例,开展颗粒饲料运动仿真分析。通过实际测量,环模孔径为 4 mm 的圆柱形颗粒饲料直径为 4.28 ~ 5.06 mm,长度为 10.38 ~ 19.40 mm,为了降低仿真计算量,在颗粒饲料建模时,将颗粒饲料直径统一设置为 4.0 mm,长度统一设置为 12.0 mm,将建立好的槽型整流板及颗粒饲料几何模型另存为“.stl”格式文件导入 Rocky Dem 仿真软件中,采用 Hertz - Mindlin 无滑移接触模型作为颗粒饲料与颗粒饲料之间及颗粒饲料与 PLA(聚乳酸)间的接触模型。使用排沙法测定颗粒饲料样品的密度,并依据文献[26 - 27]试验方法,测得颗粒饲料与颗粒饲料以及颗粒饲料与 PLA 材料间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数。槽型整流板及颗粒饲料离散元仿真模型如图 3 所示。

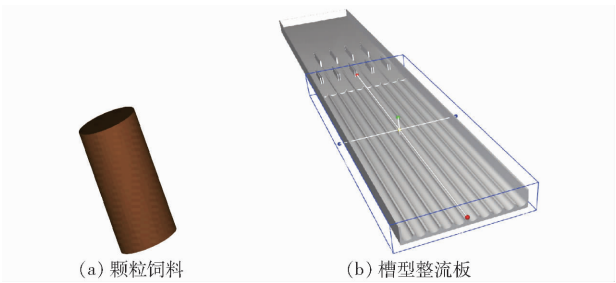


图 3 颗粒饲料及槽型整流板离散元仿真模型
Fig. 3 Discrete element simulation model of particle feed and channel rectifier

颗粒饲料及相关物料接触参数如表 1 所示。

3.2 槽型整流板工作参数单因素仿真试验

为探究颗粒饲料在槽型整流板上的运动状态,以颗粒饲料进入整流槽为仿真试验处理区域。结合

表 1 仿真参数	
Tab. 1 Simulation parameters	
参数	数值
颗粒饲料密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 130. 74
PLA 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 119. 87
颗粒饲料泊松比	0. 39
PLA 泊松比	0. 42
颗粒饲料杨氏模量/MPa	246. 94
PLA 杨氏模量/MPa	2 510. 38
饲料-饲料间静摩擦因数	0. 27
饲料-饲料间动摩擦因数	0. 16
饲料-饲料间碰撞恢复系数	0. 53
饲料- PLA 间静摩擦因数	0. 60
饲料- PLA 间动摩擦因数	0. 17
饲料- PLA 间碰撞恢复系数	0. 56

前文对颗粒饲料滑移运动分析结论,以槽型整流板安装倾角、振动频率、振幅及整流槽转向系数(定义颗粒饲料直径与整流槽间直径比为整流槽转向系数)为试验因素;为衡量后续图像处理对颗粒饲料直径、长度等尺寸参数的提取精度与提取效率,以整流槽内颗粒饲料滑移平均速度及滑移速度变异系数为评价指标,进行单因素仿真试验。

3.2.1 槽型整流板安装倾角

设定槽型整流板振频为 100 Hz、振幅为 0.4 mm、整流槽转向系数为 2.5,根据颗粒饲料-槽型整流板间动摩擦因数,分别设置槽型整流板安装倾角为 4°、7°、10°、13°、16°进行单因素仿真试验,结果如表 2 所示。

表 2 不同安装倾角时颗粒饲料滑移均速及速度变异系数
Tab. 2 Particle slip average velocity and velocity variation coefficient at different installation angles

安装倾角/(°)	滑移均速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	滑移速度变异系数/%
4	0. 215	6. 23
7	0. 259	3. 68
10	0. 388	6. 03
13	0. 505	6. 89
16	0. 599	11. 74

由表 2 可以看出,随着槽型整流板安装倾角的增大,颗粒饲料滑移均速逐渐增加,滑移速度变异系数先降低后增加,说明安装倾角对颗粒饲料的滑移稳定性有一定的影响:

(1)颗粒饲料分散性分析:以颗粒饲料在整流槽内轴向质心位置标准差表征其在槽型整流板上的分散性,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,当安装倾角为 4°和 7°时,颗粒饲料轴向质心位置标准差随时间变化平稳,表明颗粒饲料在滑槽内能够保持稳

定的分散滑移运动;当安装倾角为 10°时,颗粒饲料轴向质心位置标准差均值较大,表明在此条件下滑槽内颗粒饲料分散性进一步提升;当安装倾角为 13°和 16°时,颗粒饲料轴向质心位置标准差-时间曲线波动剧烈,结合仿真过程,上述情形可能由颗粒饲料在整流槽入口处出现堵塞,无法顺利连贯进入整流槽所致。

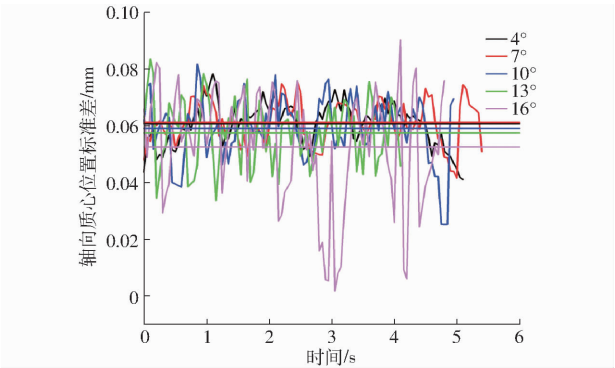


图 4 不同安装倾角时颗粒饲料轴向质心位置标准差变化曲线

Fig. 4 Standard deviation of axial centroid position of feed particles at different installation angles

(2)颗粒饲料滑移速度分析:槽型整流板不同安装倾角条件下,颗粒饲料在整流槽内滑移速度随时间变化曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,当安装倾角为 4°和 7°时,颗粒饲料滑移速度随时间变化曲线波动较为平稳,结合表 2 中该条件下颗粒饲料滑移速度变异系数,表明在整流槽内能够保持稳定的滑移状态;当安装倾角为 10°时,颗粒饲料滑移速度增加,临近工业相机采集阈值;当安装倾角为 13°及 16°时,颗粒饲料滑移速度随时间变化曲线波动性增加,表明颗粒饲料在整流槽内处于失稳状态。

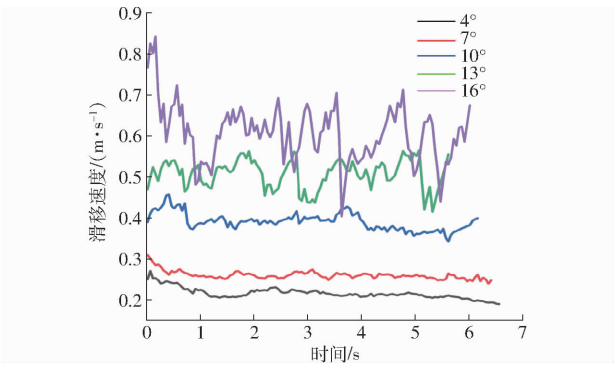


图 5 不同安装倾角时颗粒饲料滑移速度随时间变化曲线

Fig. 5 Change of feed particle slip velocity with time at different installation angles

通过以上分析,确定槽型整流板安装倾角为 7°。

3.2.2 振动频率

设定槽型整流板安装倾角为 7°、振幅为 0.4 mm、整流槽转向系数为 2.5,根据前期预试验结

果,分别设置槽型整流板振动频率为 80、90、100、110、120 Hz 进行单因素仿真试验,结果如表 3 所示。

表 3 不同振动频率时颗粒饲料滑移均速及滑移速度变异系数

Tab. 3 Particle slip average velocity and velocity variation coefficient at different vibration frequencies

振动频率/Hz	滑移均速/(m·s ⁻¹)	滑移速度变异系数/%
80	0.198	10.73
90	0.232	6.01
100	0.259	3.68
110	0.284	3.74
120	0.307	3.82

由表 3 可以看出,随着槽型整流板振动频率增大,颗粒饲料滑移均速逐渐增加,但增加幅度小于安装倾角,滑移速度变异系数先下降后基本保持稳定,仿真试验结果表明,当振动频率大于 100 Hz 时,颗粒饲料的滑移速度稳定性较好。因此,对不同槽型整流板振动频率下的颗粒饲料开展分散性和滑移速度分析:

(1)颗粒饲料分散性分析:不同振动频率条件下,颗粒饲料轴向质心位置标准差随时间变化曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,当槽型整流板振动频率为 80 Hz 和 90 Hz 时,颗粒饲料轴向质心位置标准差均值较小,表明颗粒饲料在整流槽内分散性不佳,结合仿真过程可知,上述情形由颗粒饲料在整流槽内出现粘连所致;当槽型整流板振动频率为 100、110、120 Hz 时,颗粒饲料沿整流槽轴向质心位置标准差均值较大,表明颗粒饲料在整流槽内分散性较好。

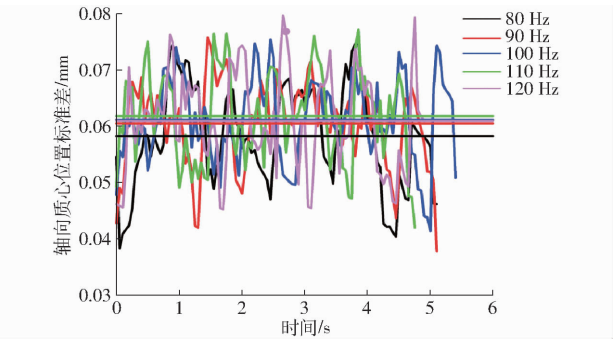


图 6 不同振动频率时颗粒饲料轴向质心位置标准差变化曲线

Fig. 6 Standard deviation of axial centroid position of feed particles at different vibration frequencies

(2)颗粒饲料滑移速度分析:不同振动频率条件下,颗粒饲料在滑槽内滑移速度随时间变化曲线如图 7 所示。可知,当振动频率为 80 Hz 时,颗粒饲料滑移均速最小但滑移速度变异系数最大,结合仿真过程可知,此条件下颗粒在整流槽入口处易出现

堵塞现象,不易进入滑槽,是造成颗粒饲料滑移速度变异系数过大的主要原因;当振动频率为 90、100、110 Hz 时,颗粒饲料滑移速度进一步增加,但结合表 3 可以看出,此时颗粒饲料滑移速度变异系数先下降后保持稳定,表明颗粒饲料在整流槽内能够保持较为稳定的分散滑移运动状态,滑移速度稳定性得到改善;当振动频率为 120 Hz 时,颗粒饲料滑移均速最大且滑移速度随时间变化曲线稳定性较好。

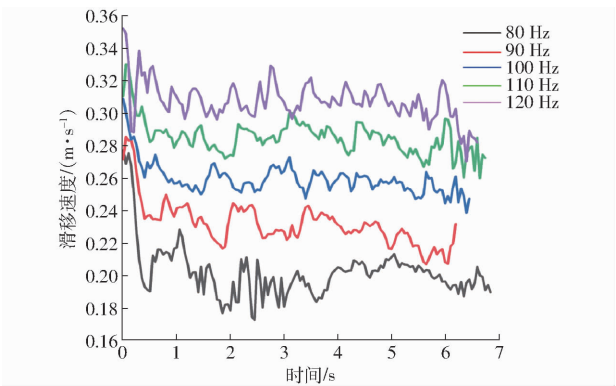


图 7 不同振动频率时颗粒饲料滑移速度随时间变化曲线

Fig. 7 Changes of feed particle slip velocity with time at different vibration frequencies

通过以上分析,确定槽型整流板振动频率为 100 Hz。

3.2.3 振幅

设定槽型整流板安装倾角为 7°、振动频率为 100 Hz、整流槽转向系数为 2.5,分别设置振幅为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mm 进行单因素仿真试验,结果如表 4 所示。

表 4 不同振幅时颗粒滑移均速及滑移速度变异系数		
Tab.4 Particle slip average velocity and velocity variation coefficient at different amplitudes		
振幅/mm	滑移均速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	滑移速度变异系数/%
0.2	0.138	15.80
0.3	0.203	16.86
0.4	0.259	3.72
0.5	0.321	3.27
0.6	0.381	3.04

由表 4 可以看出,随着振幅增大,颗粒饲料滑移均速逐渐增加,滑移速度变异系数先小幅增加后大幅下降并趋于稳定,说明振幅对颗粒饲料的滑移速度稳定性具有一定影响:

(1)颗粒饲料分散性分析:不同振幅条件下,颗粒饲料轴向质心位置标准差随时间变化曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,当振幅为 0.2、0.3 mm 时,颗粒饲料轴向质心位置标准差时间曲线图呈中间高两边低分布,结合仿真工作过程,是由于颗粒饲料在

进入整流槽入口处易发生堵塞现象,在整流槽尾端易发生颗粒粘连现象所致;当振幅为 0.4、0.5 mm 时,颗粒饲料轴向质心位置标准差时间曲线图主要在各个水平均值上下波动,表明颗粒饲料能够在整流槽内保持稳定分散的滑移运动;当振幅为 0.6 mm 时,颗粒饲料在整流槽内分散性较好但波动性较大,结合仿真工作过程,此时颗粒饲料在整流槽内开始出现抛掷运动,不具备稳定性。

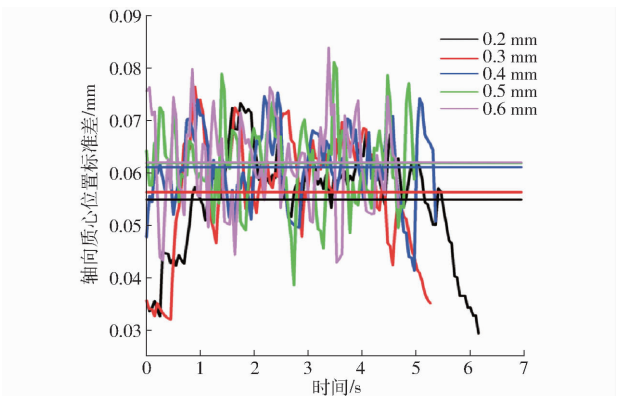


图 8 不同振幅时颗粒饲料轴向质心位置标准差变化曲线

Fig. 8 Standard deviation of axial centroid position of feed particles at different amplitudes

(2)颗粒饲料滑移速度分析:不同振幅条件下,颗粒饲料在整流槽内滑移速度随时间变化曲线如图 9 所示。可知,当振幅为 0.2、0.3 mm 时,颗粒饲料滑移速度较小,结合表 4 中颗粒饲料滑移速度变异系数变化情况,该条件下颗粒饲料易出现颗粒饲料堵塞或粘连现象,不易保持稳定分散的滑移运动状态;当振幅为 0.4、0.5 mm 时,颗粒饲料在整流槽内的滑移速度增加且随时间变化曲线波动较为稳定;当振幅为 0.6 mm 时,颗粒饲料滑移均速逼近工业相机采集阈值,后续图像处理过程易出现掉帧现象,影响颗粒饲料长度、直径提取精度。

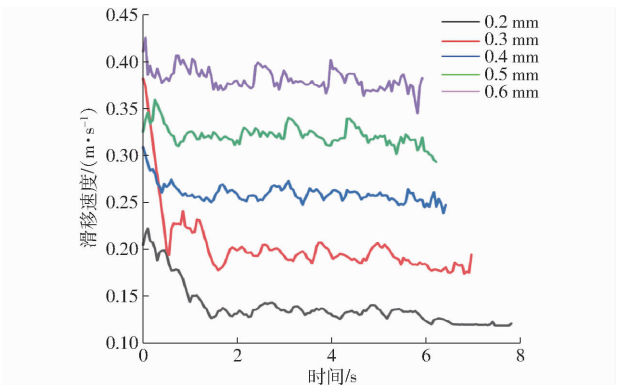


图 9 不同振幅时颗粒饲料滑移速度变化曲线

Fig. 9 Feed particle slip velocity at different amplitudes

综上,确定槽型整流板振幅为 0.4 mm。

3.2.4 整流槽转向系数

设定槽型整流板安装倾角为 7°、振频为 100 Hz

及振幅为 0.4 mm,分别设置整流槽转向系数为 2.0、2.5、3.0 进行单因素仿真试验,结果如表 5 所示。

表 5 不同整流槽转向系数时颗粒饲料滑移均速及滑移速度变异系数

Tab.5 Average slip velocity and velocity variation coefficient of different chute steering coefficients		
整流槽转向系数	滑移均速/(m·s ⁻¹)	滑移速度变异系数/%
2.0	0.259	5.42
2.5	0.259	3.68
3.0	0.261	5.57

由表 5 可以看出,随着整流槽转向系数的增大,颗粒饲料滑移均速近乎保持不变,说明整流槽转向系数对颗粒饲料滑移速度没有显著影响,滑移速度变异系数先降低后增加,说明不同整流槽转向系数对颗粒饲料的滑移稳定性影响大于滑移速度。

(1)颗粒饲料分散性分析:不同整流槽转向系数条件下,颗粒饲料轴向质心位置标准差-时间曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,当整流槽转向系数为 2.0 时,颗粒饲料轴向质心位置标准差-时间曲线波动较大,结合仿真过程可知,上述情形可能由颗粒饲料在整流槽入口及尾端易发生堆积所致;当整流槽转向系数为 2.5 时,整流槽内颗粒饲料分散性较为稳定;当整流槽转向系数为 3.0 时,结合仿真过程可知,造成此时颗粒饲料轴向质心位置标准差-时间曲线波动较大的原因是,颗粒饲料在整流槽入口处易发生并列滑移状态,随着滑移时间增加及振动激励影响,并列滑移状态下的颗粒饲料解除并列滑移状态,从而加剧颗粒饲料轴向质心位置标准差-时间曲线的波动性。

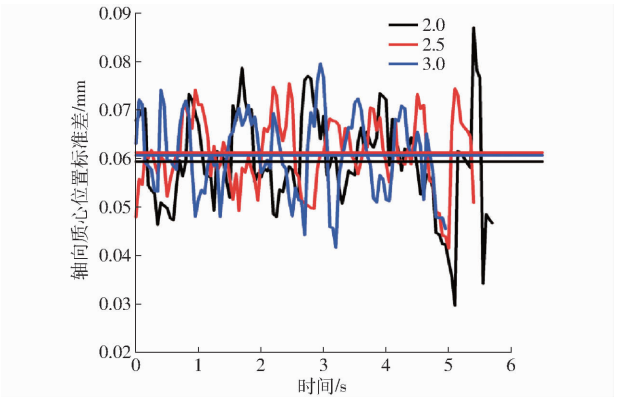


图 10 不同整流槽转向系数时颗粒饲料轴向质心位置标准差变化曲线

Fig. 10 Standard deviation of axial centroid position of feed particles with different chute steering coefficients

(2)颗粒饲料滑移速度分析:不同整流槽转向系数条件下,颗粒饲料在整流槽内滑移速度随时间变化曲线如图 11 所示。可知,当整流槽转向系数变

化时,颗粒饲料滑移均速几乎不受影响。

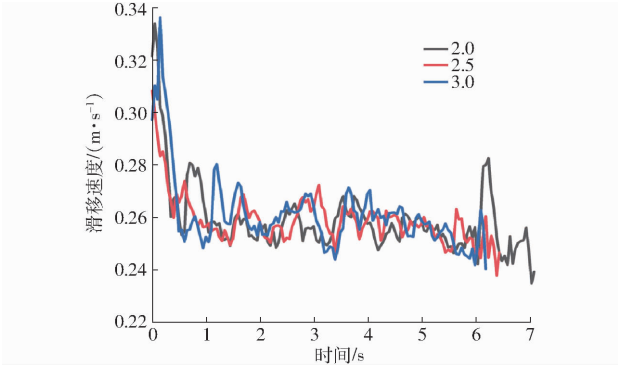


图 11 不同滑槽转向系数时颗粒饲料滑移速度变化曲线

Fig. 11 Feed particle slip speed with different chute steering coefficients

综上,确定槽型整流板滑槽转向系数为 2.5。

3.3 槽型整流板工作参数正交仿真试验

3.3.1 仿真试验设计与结果

为了获得槽型整流板最佳工作参数,结合单因素仿真试验结果,以槽型整流板安装倾角、振动频率、振幅为试验因素,颗粒饲料滑移均速 Y_1 和滑移速度变异系数 Y_2 为评价指标,开展三因素三水平正交仿真试验。试验因素编码如表 6 所示。试验方案与结果如表 7 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素安装倾角、振动频率、振幅编码值。

表 6 试验因素编码			
Tab.6 Test factors and codes			
编码	因素		
	安装倾角/(°)	振动频率/Hz	振幅/mm
-1	4	90	0.3
0	7	100	0.4
1	10	110	0.5

表 7 试验方案与结果					
Tab.7 Experimental protocol and results					
试验序号	因素			Y_1 / (m·s ⁻¹)	Y_2 / %
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	0.187	6.92
2	1	-1	0	0.375	6.41
3	-1	1	0	0.245	4.89
4	1	1	0	0.391	5.32
5	-1	0	-1	0.149	12.84
6	1	0	-1	0.364	4.45
7	-1	0	1	0.285	2.51
8	1	0	1	0.430	10.03
9	0	-1	-1	0.182	10.78
10	0	1	-1	0.218	8.44
11	0	-1	1	0.289	3.32
12	0	1	1	0.350	5.86
13	0	0	0	0.260	4.73
14	0	0	0	0.261	4.65
15	0	0	0	0.262	6.07
16	0	0	0	0.259	3.44
17	0	0	0	0.259	4.67

3.3.2 颗粒饲料滑移均速方差及响应面分析

运用 Design-Expert 软件对颗粒饲料滑移均速 Y_1 建立回归模型并进行方差分析,确定各试验因素对颗粒饲料滑移均速影响的显著性,结果如表 8 所示。由表 8 可知,颗粒饲料滑移均速二次回归模型 $P<0.01$,表明回归模型极显著;模型的一次项 X_1 、 X_2 和 X_3 影响均极显著;二次项 X_1^2 影响极显著;交互项 X_1X_3 影响极显著, X_1X_2 影响显著,其余各项不显著。根据回归模型各因素回归系数,得到各试验因素对颗粒饲料滑移均速影响的主次顺序为 X_1 、 X_3 、 X_2 ,即安装倾角、振幅、振动频率。

表 8 颗粒饲料滑移均速方差分析

Tab.8 Mean velocity variance analysis of feed particle slip				
方差来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	0.098 0	9	232.06	<0.000 1
X_1	0.060 2	1	1 282.70	<0.000 1
X_2	0.003 7	1	77.88	<0.000 1
X_3	0.024 3	1	517.95	<0.000 1
X_1X_2	0.000 4	1	9.40	0.018 2
X_1X_3	0.001 2	1	26.10	0.001 4
X_2X_3	0.000 2	1	3.33	0.110 8
X_1^2	0.007 9	1	168.00	<0.000 1
X_2^2	0.000 1	1	1.42	0.272 6
X_3^2	0.000 1	1	1.11	0.326 1
残差	0.000 3	7		
失拟	0.000 3	3	63.09	0.000 8
误差	6.800×10^{-6}	4		
总误差	0.098 4	16		

剔除方差分析结果中不显著项,建立颗粒饲料滑移均速 Y_1 的回归方程为

$$Y_1 = 0.260\,2 + 0.086\,8X_1 + 0.021\,4X_2 + 0.055\,1X_3 - 0.010\,5X_1X_2 - 0.017\,5X_1X_3 + 0.043\,3X_1^2 \quad (20)$$

图 12 为各试验因素交互作用对颗粒饲料滑移均速的响应曲面。

由图 12a 可知,在槽型整流板振动频率保持同一水平时,颗粒饲料滑移均速随槽型整流板安装倾角增大而增大,且增大幅度随安装倾角的增大逐渐提高,其原因为随着槽型整流板安装倾角的增大,槽型整流板对颗粒饲料的滞留作用逐渐减小,因此颗粒饲料滑移均速逐渐增大。相比于槽型整流板安装倾角对颗粒饲料滑移均速的影响,振动频率的变化较小,但同样呈现槽型整流板安装倾角一定时,颗粒饲料滑移均速随着振动频率的增大而增大。

由图 12b 可知,在槽型整流板振动频率保持同一水平时,颗粒饲料滑移均速随槽型整流板振幅的增大而增大,其原因为随着振幅的增大,槽型整流板

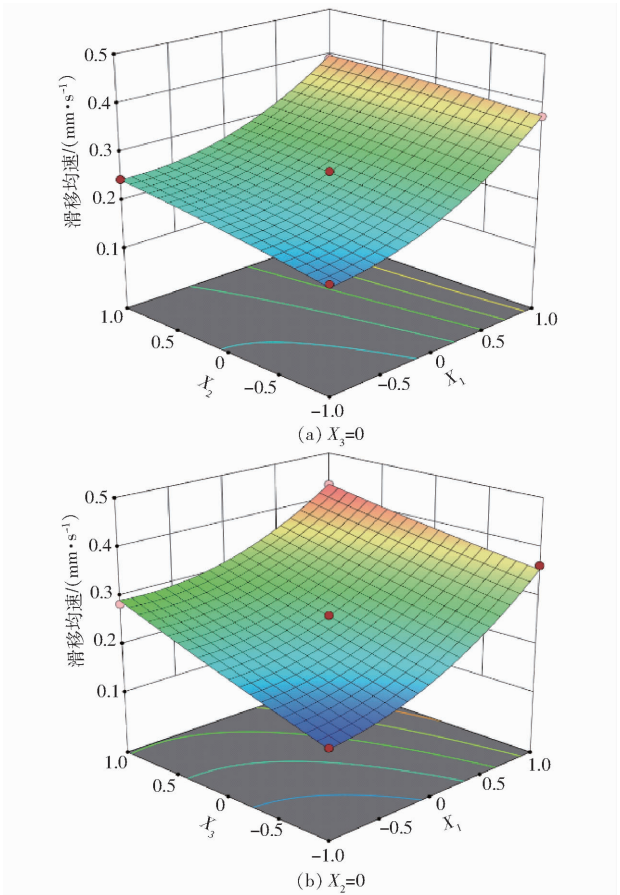


图 12 各试验因素交互作用对颗粒饲料滑移均速影响的响应曲面

Fig.12 Response surfaces of effect of factors on average slip velocity of feed particles

上颗粒饲料所受激振力增加,提高了颗粒饲料产生的滑移运动概率,因此颗粒饲料滑移均速逐渐增大。相比于振幅对于颗粒饲料滑移均速的影响,槽型整流板安装倾角对于颗粒饲料滑移均速的影响趋势与振幅相同,且影响程度大于振幅,与前文颗粒饲料滑移均速方差分析结果一致。

3.3.3 颗粒饲料滑移速度变异系数方差及响应面分析

运用 Design-Expert 软件对颗粒饲料滑移速度变异系数 Y_2 建立回归模型并进行方差分析,确定各试验因素对颗粒饲料滑移速度变异系数影响的显著性,结果如表 9 所示。

由表 9 可知,颗粒饲料滑移速度变异系数二次回归模型 $P<0.01$,表明回归模型极显著;失拟项 $P>0.05$,失拟不显著。回归模型的一次项 X_3 影响极显著;二次项 X_3^2 影响极显著;交互项 X_1X_3 影响极显著,其余各项均不显著。根据回归模型各因素回归系数的大小,得到各试验因素对颗粒饲料滑移速度变异系数影响的主次顺序为 X_3 、 X_2 、 X_1 ,即振幅、振动频率、安装倾角。

表 9 颗粒饲料滑移速度变异系数方差分析

Tab.9 Variance analysis of coefficient of variation
of feed particle velocity

方差来源	平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	119.01	9	10.99	0.002 3
<i>X</i> ₁	0.112 8	1	0.093 8	0.768 3
<i>X</i> ₂	1.07	1	0.885 9	0.377 9
<i>X</i> ₃	27.34	1	22.73	0.002 0
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.220 9	1	0.1836	0.681 2
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	63.28	1	52.60	0.000 2
<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	5.95	1	4.95	0.061 5
<i>X</i> ₁ ²	2.47	1	2.05	0.195 4
<i>X</i> ₂ ²	0.700 0	1	0.581 9	0.470 5
<i>X</i> ₃ ²	16.51	1	13.72	0.007 6
残差	8.42	7		
失拟	4.95	3	1.90	0.270 2
误差	3.47	4		
总误差	127.43	16		

剔除方差分析结果中不显著二次项、交互项,建立颗粒饲料滑移速度变异系数 *Y*₂ 的回归方程为

$$Y_2 = 4.71 - 0.118\,7X_1 - 0.365\,0X_2 - 1.85X_3 + 3.98X_1X_3 + 1.98X_3^2$$

(21)

图 13 为各试验因素交互作用对颗粒饲料滑移速度变异系数影响的响应曲面。

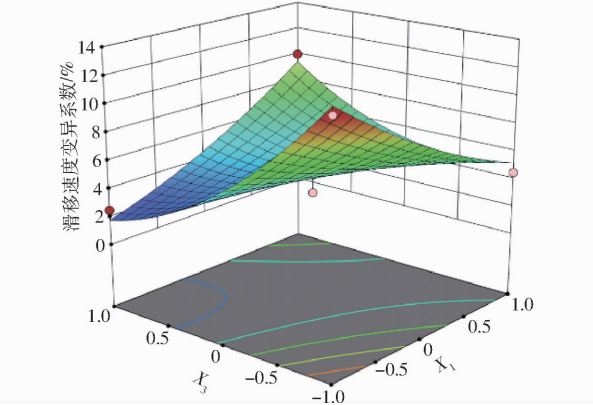


图 13 各试验因素交互作用对颗粒饲料滑移速度变异系数影响的响应曲面 (*X*₂ = 0)

Fig.13 Response surface of effect of factors on variation coefficient of feed particle velocity (*X*₂ = 0)

由图 13 可知,在振幅保持同一水平时,颗粒饲料滑移速度变异系数随着槽型整流板安装倾角的增加而降低,其原因为随着槽型整流板安装倾角的增加,槽型整流板对颗粒饲料的滞留作用逐渐减小,颗粒饲料滑移速度增加,颗粒饲料均能以较快的滑移速度通过滑槽,不易在滑槽内出现停滞现象,因此颗粒饲料滑移速度变异系数较小。相比于槽型整流板安装倾角对颗粒饲料滑移速度变异系数的影响,振幅的变化较大,但同样呈现槽型整流板安装倾角一定时,颗粒饲料滑移速度变异系数随着振动频率的

增加而降低,与前文对于颗粒饲料滑移速度变异系数方差分析结果一致。

3.3.4 试验结果优化

颗粒饲料在槽型整流板滑槽内做滑移运动时,若颗粒饲料滑移速度超过相机采集速度上限,会出现图像失帧现象;若颗粒饲料滑移速度变异系数较大,则表征滑槽内颗粒饲料滑移运动不具备稳定性,较易出现堵料现象。因此,以颗粒饲料滑移均速最大和颗粒饲料滑移速度变异系数最小为优化目标进行优化。

通过 Design-Expert 13.0 求解得到槽型整流板安装倾角为 6.33°、振动频率为 101.49 Hz、振幅为 0.50 mm 时,颗粒饲料滑移均速和滑移速度变异系数综合最优,分别为 0.31 m/s 和 4.10%。结合实际安装条件,以槽型整流板安装倾角为 6°、振动频率为 100 Hz、振幅为 0.50 mm 为工作参数组合设置进行后续验证试验。

4 验证试验

4.1 材料与方法

4.1.1 试验材料

本试验所用样品随机取自某饲料企业生产的环模孔径分别为 3、4、5 mm 的仔猪养殖硬质颗粒饲料各 50 g。

4.1.2 试验仪器设备

采用自主设计搭建的颗粒饲料尺寸检测仪,对其测量精度进行验证试验。颗粒饲料尺寸检测仪如图 14 所示。槽型整流板材质为 PLA,工业相机采用大恒图像公司的 ME2P-1230-23U3C 型 CMOS 彩色工业相机;镜头选用 V2528-MPY 型变焦高清工业镜头;光源选用 MW-A008A-AE 型条形 LED 光源,其功率为 8 W,显色指数,色温最高 5 700 K。

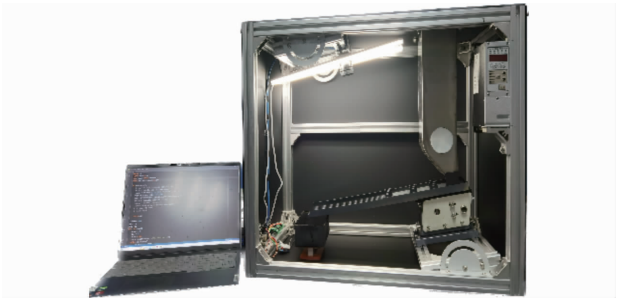


图 14 颗粒饲料尺寸自动检测仪实物图

Fig.14 Physical picture of automatic pellet feed size detector

4.1.3 试验方法

选取环模孔径分别为 3、4、5 mm 的颗粒饲料各 50 g 进行试验验证。使用数显游标卡尺(精度 0.01 mm)人工测量颗粒饲料样品的长度、直径用于

验证检测仪器的测量精度。

以环模孔径为 4 mm 的颗粒饲料为例,调用 Python 编程语言中的 Open CV 算法库函数,经图像

灰度化、二值化及轮廓选择,结合形态学处理等图像处理办法,提取颗粒饲料轮廓长度和直径信息,图像处理过程如图 15 所示。

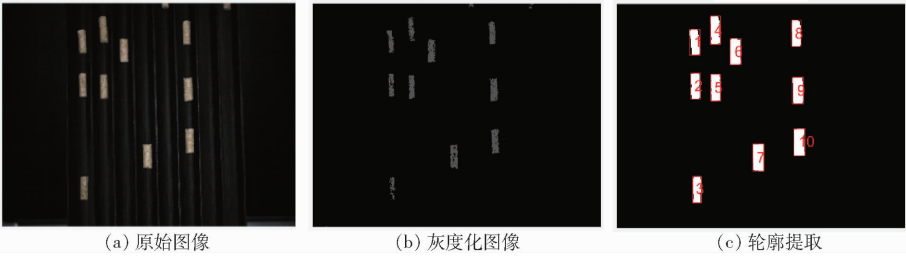


图 15 颗粒饲料图像处理过程

Fig. 15 Imaging of particle feed

4.2 结果与分析

通过对人工测量结果和检测仪器测量结果统计,环模孔径分别为 3、4、5 mm 的颗粒饲料直径和长度人工测量和自动检测仪检测结果如表 10、11 所示。

表 10 不同环模孔径的颗粒饲料直径人工与仪器测量结果描述性统计

Tab. 10 Descriptive statistics of results of artificial and instrumental measurements of particle feed diameter of different ring mould cavities

环模孔径/mm	测量方式	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	标准差/mm	变异系数/%
3	人工测量	4.20	3.28	3.83	0.17	4.52
	仪器测量	4.18	3.22	3.84	0.21	5.53
4	人工测量	5.06	4.28	4.61	0.21	4.54
	仪器测量	5.04	4.25	4.60	0.21	4.65
5	人工测量	5.20	4.74	4.98	0.14	2.80
	仪器测量	5.19	4.73	4.97	0.14	2.83

由表 10 可知,不同环模孔径的颗粒饲料直径人工与仪器测量平均值的最大绝对误差为 0.01 mm,表征颗粒饲料直径离散程度的变异系数也十分接近,人工与检测仪测量颗粒直径变异系数相差最大值为 1.01%。由表 11 可知,不同环模孔径的颗粒饲料长度人工与仪器测量平均值的最大绝对误差为 0.15 mm,表征颗粒饲料长度离散程度的变异系数也十分接近,人工与检测仪测量颗粒长度变异系数

表 11 不同环模孔径的颗粒饲料长度人工与仪器测量值描述性统计

Tab. 11 Descriptive statistics of artificial and instrumental measurement values of particle feed lengths of different ring mould cavities

环模孔径/mm	测量方式	最大值/mm	最小值/mm	平均值/mm	标准差/mm	变异系数/%
3	人工测量	14.72	10.64	12.00	0.98	8.12
	仪器测量	14.60	10.28	11.86	1.04	8.76
4	人工测量	18.67	12.54	15.22	1.43	9.34
	仪器测量	18.60	12.51	15.07	1.40	9.27
5	人工测量	18.69	13.56	16.21	1.21	7.43
	仪器测量	18.85	13.73	16.16	1.22	7.55

相差最大值为 0.64%。结果表明,设计开发的颗粒饲料尺寸自动检测仪可以满足实际检测精度要求。

为了验证检测仪自动测量值与人工测量值之间的相关性,采用一元线性回归的方法,得到仪器测量值与人工测量值之间的相关关系。环模孔径为 3、4、5 mm 的颗粒饲料直径和长度的仪器测量值与人工测量值之间的相关关系分别如图 16、17 所示。

从图 16 可知,环模孔径为 3、4、5 mm 的颗粒饲料直径决定系数分别为 0.953、0.990、0.978,其平均绝对误差分别为 0.048、0.020、0.012 mm;从图 17 可知,环模孔径为 3、4、5 mm 的颗粒饲料长度决定系数分别为 0.979、0.989、0.983,其平均绝对误差分别为 0.164、0.162、0.103 mm。结果表

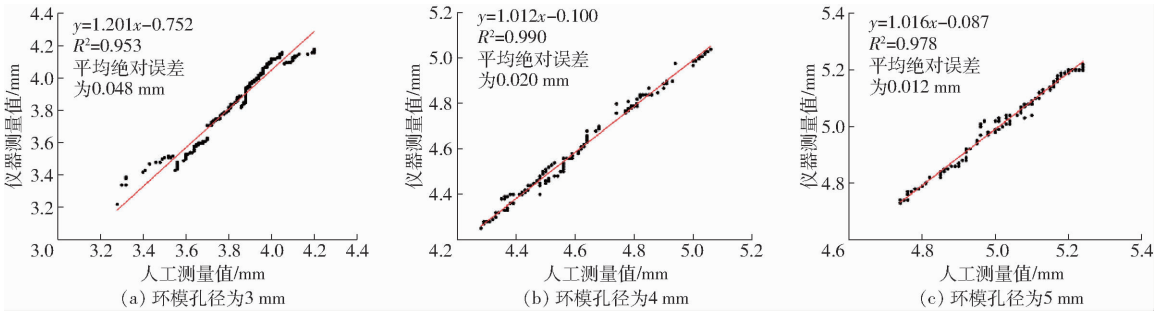


图 16 颗粒饲料直径仪器测量值与人工测量值相关关系拟合曲线

Fig. 16 Particle feed diameter instrumental measurement values related to artificial measurement values

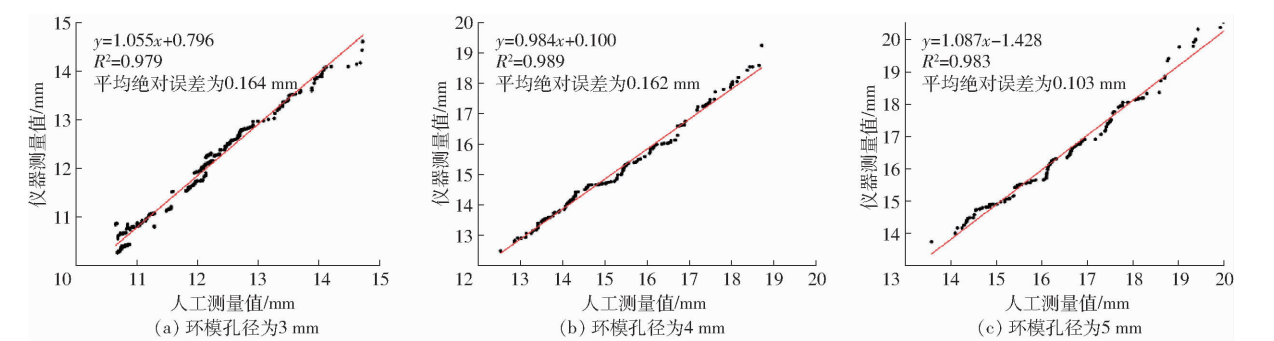


图 17 颗粒饲料长度仪器测量值与人工测量值相关关系拟合曲线

Fig. 17 Particle feed length instrumental measurement values related to artificial measurement values

明,颗粒饲料尺寸自动检测仪测量准确性较高,测量精度满足测量要求,可以用于颗粒饲料尺寸的实际检测。

5 结论

(1)设计了一种颗粒饲料尺寸自动检测仪,利用离散元法对颗粒饲料尺寸自动检测仪关键部件——槽型整流板进行优化设计。对颗粒饲料在整流槽内运动特性及受力情况进行分析,通过单因素仿真试验分析了槽型整流板安装倾角、振动频率、振幅及整流槽转向系数对颗粒饲料滑移均速和滑移速度变异系数的影响,得出影响颗粒饲料滑移均速及滑移速度变异系数的主要因素为槽型整流板安装倾角、振动频率、振幅。

(2)以槽型整流板安装倾角、振动频率及振幅作为试验因素进行三因素三水平正交仿真试验,建立颗粒饲料滑移均速和滑移速度变异系数的回归模型。对颗粒饲料滑移均速及滑移速度变异系数进行回归模型方差分析,确定槽型整流板最优工作参数:安装倾角为 6.33°、振动频率为 101.49 Hz、振幅为 0.50 mm。

(3)结合工业相机搭建了颗粒饲料尺寸自动检测仪,进行试验验证。将尺寸自动检测仪图像处理结果与人工测量结果进行对比,自动检测仪对环模孔径分别为 3、4、5 mm 的颗粒饲料直径自动测量结果平均绝对误差分别为 0.048、0.020、0.012 mm;长度自动测量结果平均绝对误差分别为 0.164、0.162、0.103 mm,满足设备使用要求。

参 考 文 献

[1] 李峰,宋文静,王盛男. 颗粒饲料品质的改进[J]. 畜牧产业,2014(9):34-37.
LI Feng, SONG Wenjing, WANG Shengnan. Improvements in the quality of grain feed[J]. Animal Agriculture, 2014(9): 34-37. (in Chinese)

[2] 陈人弼. 中国水产配合饲料工业发展现状与前景分析[J]. 中国饲料,2012(23):43-45.
CHEN Renbi. Analysis of the status and prospects of the development of China's aquaculture and feed industry[J]. China Feed, 2012(23): 43-45. (in Chinese)

[3] 李兆勇,刘淑路,洪冰,等. 颗粒饲料在畜牧业生产中的研究与应用[J]. 饲料世界,2006(6):12-14.
LI Zhao Yong, LIU Shu Lu, HONG Bing, et al. Research and application of grain feed in livestock production[J]. The Word of Feed, 2006(6): 12-14. (in Chinese)

[4] 王卫国. 饲料粉碎粒度最新研究进展[J]. 粮食与饲料工业,2001(11):16-19.
WANG Wei Guo. Progress in the latest research on feed fragmentation[J]. Cereal & Feed Industry, 2001(11): 16-19. (in Chinese)

[5] 段海涛,秦玉昌,于纪宾,等. 粉碎粒度对生长猪颗粒饲料加工质量及其生长性能的影响[J]. 动物营养学报,2015,27(7):2038-2043.
DUAN Haitao, QIN Yuchang, YU Jibin, et al. Effects of fragmentation on the quality of processing of pig grain feed and its growth performance[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2015, 27(7): 2038-2043. (in Chinese)

[6] ANSI/ASAE S319.4—2008 Method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving[S]. American Society of Agricultural and Biological Engineers,2008.

[7] 孙智慧,李伟. 压电振动给料技术及装置的研究进展[J]. 包装与食品机械,2013,31(3):55-59.
SUN Zhihui, LI Wei. Progress in the research of pressurized electrical vibration feed technology and devices[J]. Packaging and Food Machinery, 2013, 31(3): 55-59. (in Chinese)

[8] SUN Zhihui,JIANG Li,XIAO Wei.The model and experimental study of spiral piezoelectric vibration feeder[C]//Proceedings of 2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT). IEEE Beijing Section, 2015: 177-179.

[9] 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 Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J].

- Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 117 – 121. (in Chinese)
- [10] 辛丽丽, 梁继辉, 闻邦椿, 等. 考虑物料结合系数的倾角振动输送机系统动力学分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 87 – 90.
XIN Lili, LIANG Jihui, WEN Bangchun, et al. Analysis of a vibrating conveyer with inclination in consideration of material combination coefficient[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 87 – 90. (in Chinese)
- [11] 王应彪, 赵学观, 徐丽明, 等. 基于电磁振动的玉米种子定向排序输送技术[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 79 – 88.
WANG Yingbiao, ZHAO Xueguan, XU Liming, et al. Experiment and directional movement technology of corn seed based on electromagnetic vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 79 – 88. (in Chinese)
- [12] 张斌, 俞亚新, 赵匀. 超级稻种定向播种的原理研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008, 25(4): 454 – 456.
ZHANG Bin, YU Yaxin, ZHAO Yun. Research on the principle of super rice seed-oriented seeding[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2008, 25(4): 454 – 456. (in Chinese)
- [13] 刘辉, 史学峰, 李丽珍, 等. 筛分法和显微镜法对矿化垃圾粒径分布的比较[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 4007 – 4011.
LIU Hui, SHI Xuefeng, LI Lizhen, et al. Comparison of particulate distribution of mineralized waste by screening and microscopy[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 4007 – 4011. (in Chinese)
- [14] MIN X, JIN S, THOMAS J C, et al. Information-weighted constrained regularization for particle size distribution recovery in multiangle dynamic light scattering[J]. Optics Express, 2018, 26(1): 15 – 31.
- [15] 胡继林, 胡传跃, 田修营, 等. 激光粒度仪测定超细碳化硅粉体粒度研究[J]. 无机盐工业, 2016, 48(3): 66 – 68.
HU Jilin, HU Chuanyue, TIAN Xiuying, et al. Laser granulators to determine the particulate size of ultra-fine silicon carbonate powder[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2016, 48(3): 66 – 68. (in Chinese)
- [16] 刘森, 杨强, 卢浩, 等. 重力沉降法测定水-柴油乳液液粒径分布[J]. 中国测试, 2016, 42(6): 50 – 53.
LIU Sen, YANG Qiang, LU Hao, et al. Gravitational sedimentation method to determine the water – diesel lactate particle distribution[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(6): 50 – 53. (in Chinese)
- [17] 张常浩, 苏明旭, 蔡小舒. 超声法测量河流泥沙粒度大小[J]. 泥沙研究, 2006(1): 58 – 61.
ZHANG Changhao, SU Mingxu, CAI Xiaoshu. Ultrasound measures the size of the sand particles of the river mud[J]. Journal of Sediment Research, 2006(1): 58 – 61. (in Chinese)
- [18] 王亮. 基于数字图像处理技术的泥沙颗粒分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
WANG Liang. Grain size analysis of sediment based on digital image processing technology[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [19] MA Z, MERKUS H G, SCARLETT B. Extending laser diffraction for particle shape characterization: technical aspects and application[J]. Powder Technology, 2001, 118(1/2): 180 – 187.
- [20] 葛金怡, 黄光群, 韩鲁佳, 等. 猪粪颗粒粒度、粒形的量化表征方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 192 – 196.
GE Jinyi, HUANG Guangqun, HAN Lujia, et al. Quantitative characterization of particle size and shape of pig manure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 192 – 196. (in Chinese)
- [21] 何冲. 基于线阵光学成像技术的饲料物理特性检测及粉碎机筛网破损识别方法研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
HE Chong. Research on method for feed physical properties testing and crusher screen breakage recognition using linear array optical imaging technology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [22] 唐启敬, 赵铁石, 边辉, 等. 基于双目视觉的复合肥颗粒检测系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 206 – 211.
TANG Qijing, ZHAO Tieshi, BIAN Hui, et al. Compound fertilizer particle inspection system based on binocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 206 – 211. (in Chinese)
- [23] 孙颖. 机器视觉用于燃料粒度在线检测研究[D]. 太原: 山西大学, 2019.
SUN Ying. On-line detection of fuel particle size using machine vision[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019. (in Chinese)
- [24] MEBATSION H K, PALIWAL J. A Fourier analysis based algorithm to separate touching kernels in digital images[J]. Biosystems Engineering, 2011, 108(1): 66 – 74.
- [25] 瓦尔特·霍尔曼. 物料由于阻尼和质量结合对振动槽运行状态的影响[J]. 起重运输机械, 1975(6): 55 – 63.
WALTER·Holman. Impact of the material on the state of operation of the vibration tank due to the interference and quality combination[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 1975(6): 55 – 63. (in Chinese)
- [26] 牛智有, 孔宪锐, 沈柏胜, 等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 132 – 140, 207.
NIU Zhiyou, KONG Xianrui, SHEN Bosheng, et al. Parameters calibration of discrete element simulation for pellet feed attrition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 132 – 140, 207. (in Chinese)
- [27] 彭飞, 王红英, 方芳, 等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 140 – 147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 140 – 147. (in Chinese)