

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.017

保育猪饲喂器设计与排料性能试验

黄会男^{1,2} 王德福^{1,2} 李百秋¹ 张军峰¹ 李佳奇¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部生猪养殖设施工程重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要:为促进我国生猪养殖业的规模化发展,改善保育猪饲喂器排料均匀性及单位时间内排料量,在保证饲料以整体流方式排料的情况下,设计了一种保育猪饲喂器。阐述了总体结构组成和工作原理,对出料口盘和排料拨片进行了动力学与运动学分析。以影响饲喂器排料性能的主要因素为试验因素,以饲喂器排料均匀性指标变异系数和排料能力指标流量为评价指标,应用 EDEM 软件进行虚拟正交试验,并基于 Design-Expert 8.0.10 软件对模型进行多目标优化获得最优参数组合,结果表明:当主轴转速、出料口直径、斗壁倾角和充满系数分别为 45 r/min、110 mm、65°和 65% 时,变异系数和流量分别为 3.96% 和 165.93 g/s。依据以上优化参数研制饲喂器,并经试验表明:颗粒饲料流动方式为整体流;变异系数为 3.62%,流量为 149.13 g/s,饲槽内颗粒饲料分布均匀且排料效率较高。

关键词: 保育猪; 饲喂器; 优化设计; 性能试验

中图分类号: S817.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)10-0154-09

Design and Experiment of Discharging Performance of Feeder for Nursery

HUANG Huinan^{1,2} WANG Defu^{1,2} LI Baiqiu¹ ZHANG Junfeng¹ LI Jiaqi¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Swine Facilities Engineering, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: As we all know, China is one of the famous country for swine. with the development of pig breeding industry, it is important to improve feed-discharging uniformity and sufficient flow in unit time of feeders. A new type of feeder for nursery was designed based on characteristics of mass flow. The principal factors which affected the discharging performance of the feeder were determined through comprehensive analysis. In order to optimize the structural and operating parameters of the designed nursery pig feeder, virtual orthogonal test was carried out by discrete element method software with rotational speed, discharge opening diameter, angle of conical wall of the hopper and filling coefficient as experimental factors and coefficient of variation and flow as evaluation indexes. Based on experimental data, a mathematical model was built by using the Design-Expert 8.0.10 software, and the optimum parameters were obtained. The simulation experiment results showed when rotational speed was 45 r/min, discharge opening diameter was 110 mm, angle of conical wall of the hopper was 65°, and filling coefficient was 65%, coefficient of variation was 3.96% and flow was 165.93 g/s. Then the feeder was designed according to above optimized parameters, and the experiment was done. The results showed that the flow pattern of pelleted feed was mass flow; the relative error of coefficient of variation and the flow was 4.14% and 3.92%, respectively. The results were basically consistent with the simulation optimization, and the designed feeder can meet the feeding needs of nursery pig, which can ensure the quality and efficiency of the operation and provide support for the research and development of pig feeders.

Key words: nursery pig; feeders; optimal design; performance experiment

收稿日期: 2018-04-23 修回日期: 2018-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701301)、黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA16B301)和国家自然科学基金项目(51405076)

作者简介: 黄会男(1991—),女,博士生,主要从事畜牧机械研究,E-mail: 1258081488@qq.com

通信作者: 王德福(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事畜牧机械研究,E-mail: dfwang640203@sohu.com

0 引言

中国是生猪养殖大国,生猪出栏量居世界首位^[1-2]。饲料是生猪养殖的物质基础,饲喂器是猪只采食饲料所必需的重要基础设备^[3]。随着生猪养殖业的迅速发展,亟待开展饲喂器的深入研究。

国外对饲喂器研究较早,以荷兰、美国、丹麦等为代表的发达国家已研发了适于猪只不同阶段饲养要求的各类饲喂器,同时国外学者对饲喂器进行了诸多应用研究^[4-5]。我国对饲喂器研究较晚,主要是在跟踪国外成熟技术的基础上进行的,如陈安国等^[6]对引进丹麦的节料型自动干湿饲喂器进行了试验,并研究推广了适用于国内的饲喂器;麦永强^[7]研制了一种智能猪用干湿料饲喂器。综上可知,国内外已进行的饲喂器研究以企业研发设计或改进为重点,对饲喂器机理分析的创新研究报道缺乏,尤其是针对饲喂器排料过程或性能的研究分析甚少。

在应用 EDEM 软件对物料流动过程进行数值模拟仿真分析方面,众多学者展开了不同角度的研究^[8-12]。这些研究表明 EDEM 可用于预测料斗排料过程中的颗粒流动特性。

本文经综合分析确定保育猪饲喂器(以颗粒饲料为主)排料性能的评价指标以及主要影响因素,在保证颗粒饲料流动方式为整体流的前提下,运用 EDEM 仿真软件对饲喂器开展虚拟试验以确定其最优参数组合,依此设计保育猪饲喂器,为饲喂器的研究提供理论基础和技术支持。

1 饲喂器总体结构与工作原理

1.1 总体结构

保育猪饲喂器主要由料斗、主轴、排料单元、套筒、饲槽、DQ57HB112 型步进电动机和控制系统等组成,其总体结构如图 1 所示。其中料斗由圆柱和圆锥两部分组成,用于贮存饲料;主轴(直径为 10 mm)由料斗上横梁与主轴下定位盘定位,通过电动机驱动旋转并带动排料拨片排料,主轴中下部安装直径为 3 mm 的螺旋钢丝,用于搅动料斗内饲料下落;排料单元由出料口盘、排料拨片和主轴下定位盘构成,其中排料拨片在主轴下部紧贴主轴下定位盘处固定安装,用以均匀地向饲槽拨料;在料斗(距主轴下定位盘下方 90 mm)正下方处设置上口直径 430 mm、下底直径 370 mm、高 90 mm 的饲槽,且饲槽安装在底座中心。

1.2 工作原理

保育猪饲喂器工作时,电动机按饲喂器设定模

式驱动主轴旋转,主轴上安装的排料拨片拨送颗粒饲料从出料口盘与主轴下定位盘之间的排料空间中排出,主轴上安装的螺旋钢丝则在排料过程中搅动料斗中的颗粒饲料以防止结拱,进而实现颗粒饲料连续、均匀地分布到饲槽中。由设置在饲槽上方的超声波传感器(图中未画出)检测饲槽中的料层位置实现饲喂器排料自动控制,从而减少饲料浪费并保证排料量。

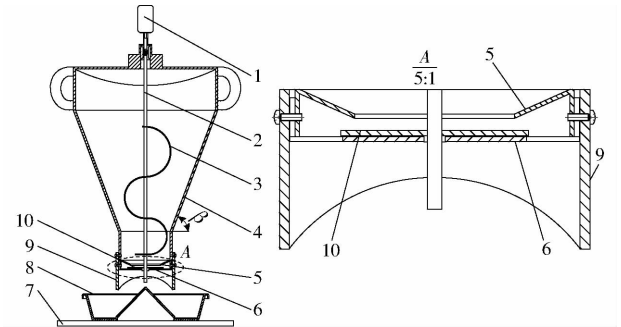


图 1 饲喂器结构示意图

Fig.1 Structural diagram of feeder

1. 电动机 2. 主轴 3. 螺旋钢丝 4. 料斗 5. 出料口盘 6. 主轴下定位盘 7. 底座 8. 饲槽 9. 套筒 10. 排料拨片

2 关键结构设计

2.1 料斗结构设计

饲喂器的料斗采用聚氯乙烯(PVC)材料,依据实际工作要求,容纳饲料质量设计为 40 kg,料斗总高 l 为 706 mm,壁厚为 6 mm,为确定料斗其他结构参数尺寸,对其进行理论分析。

如图 2 所示,料斗理论容积为

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \tag{1}$$

$$V = \frac{M_1}{\varphi\eta} \tag{2}$$

其中 $V_1 = \pi \frac{D_1^2}{4} (l_2 - l_1) \tag{3}$

$$V_2 = \frac{1}{3} \pi l_3 \left(\frac{D_1^2}{4} + \frac{D_2^2}{4} + \frac{D_1 D_2}{4} \right) \tag{4}$$

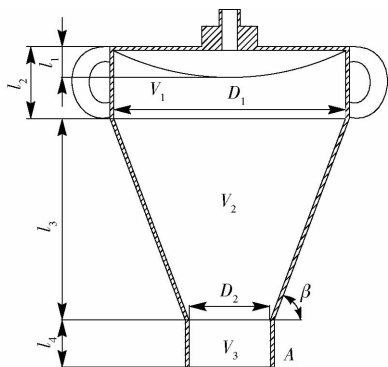


图 2 料斗结构示意图

Fig.2 Structural diagram of hopper

$$V_3 = \pi \frac{D_2^2}{4} l_4 \tag{5}$$

料斗总高为 $l = l_2 + l_3 + l_4$ (6)

式中 V ——料斗理论容积, m^3
 M_1 ——料斗容纳饲料质量, kg
 φ ——颗粒饲料容重, 取 700 kg/m^3
 η ——料斗充满系数, %
 D_1 ——进料口直径, m
 D_2 ——出口(上)段直径, m
 l_1 ——上部拱柱高, m
 l_2 ——上部圆柱高, m
 l_3 ——锥体高, m
 l_4 ——出口圆柱高, m

鉴于出口(上)段需安装排料单元, 本文取 $D_2 = 174 \text{ mm}$, $l_4 = 100 \text{ mm}$; 为保证上料方便和饲料容量, 则取 $D_1 = 515 \text{ mm}$, $l_1 = 66 \text{ mm}$, 将以上参数代入式(1)中解得

$$\frac{1}{55\eta} + 0.003 = 0.06 l_2 + 0.03 l_3 \tag{7}$$

又根据几何关系得

$$\tan\beta = \frac{2l_3}{D_1 - D_2} \tag{8}$$

式中 β ——斗壁倾角, ($^\circ$)

由式(8)可知, 当 D_1 和 D_2 为定值时, 斗壁倾角 β 与锥体高 l_3 呈正相关, 根据文献[13]可知斗壁倾角须比饲料休止角大 $5^\circ \sim 10^\circ$ 。依据已进行的颗粒饲料基本物性参数测定试验可知, 颗粒饲料最大静摩擦角和休止角分别为 33° 和 30° , 取斗壁倾角最小值为 35° ; 由料斗结构尺寸可知, 当 $l_2 = 0 \text{ mm}$ 时, 斗壁倾角 $\beta = 72^\circ$ (无法满足料斗容量设计要求), 因此本文根据料斗容量需求确定斗壁倾角最大值为 65° 。由式(8)可知, 通过斗壁倾角 β 可得到 l_3 , 则上部圆柱高 l_2 与料斗充满系数 η 直接有关, 关于饲喂器料斗充满系数, 少有文献可借鉴, 实际畜禽舍中饲喂器料斗充满系数在 $35\% \sim 70\%$, 结合预试验及实际生产中容量要求, 本文确定充满系数取值范围为 $50\% \sim 80\%$ 。

2.2 排料单元结构设计

2.2.1 出料口盘

出料口盘配置在饲喂器料斗下方出口处, 根据物性试验测定可知, 颗粒饲料与 PVC、不锈钢之间最大静摩擦因数分别为 0.4 和 0.28, 为利于均匀、稳定排料, 出料口盘采用不锈钢材料, 通过其外壁与料斗下方套筒侧壁连接。依据饲喂器料斗下方出口结构尺寸与物料特性, 确定出料口盘尺寸(图 3)为 $H = 32 \text{ mm}$, $d_2 = 180 \text{ mm}$, $h = 14 \text{ mm}$, 壁厚 2 mm, 同时

出料口盘侧壁倾角需满足 $\theta \geq 15.6^\circ$ 。目前基于圆形、方形钢板仓卸料口尺寸设计的研究较多^[14-15], 而对于保育猪饲喂器料斗出料口没有详细研究, 尤其是 PVC 材料的料斗出口处设置不锈钢材料的出料口盘情况很少见。为实现饲喂器料斗内颗粒饲料以整体流的流料方式排出(保证饲喂的饲料质量和饲喂器稳定排料), 本文依据结拱分析, 以不形成料拱的最小尺寸设计临界出料口尺寸, 对出料口盘进行理论分析以寻求保育猪饲喂器出料口直径 d 的合理范围, 其整体受力分析如图 3 所示。

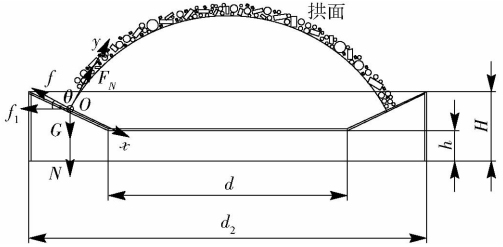


图 3 出料口盘受力分析

Fig. 3 Force analysis of discharge opening plate

在出料口盘壁面一周区域内任取一微单元颗粒饲料进行分析, 根据饲喂器工作条件可知, 颗粒饲料在自身重力 G 、上层颗粒饲料对其推挤力 N 、出料口盘壁面对其支撑力 F_N 、颗粒饲料与出料口盘壁面的摩擦力 f 及颗粒饲料群内摩擦力 f_1 共同作用下向下流动, 将力系向出料口盘壁面的切向和法向进行分解, 若要防止结拱现象发生, 保证排料松散、顺畅, 则合力的理想化方向应指向切向方向, 以此建立力学平衡方程式

$$\begin{cases} ma = G\sin\theta + N\sin\theta - f - f_1\cos\theta \\ F_N = f_1\sin\theta + N\cos\theta + G\cos\theta \end{cases} \tag{9}$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = \mu_2 N \\ f = \mu F_N \\ G = mg \end{cases} \tag{10}$$

式中 m ——颗粒饲料质量, kg
 a ——颗粒饲料切向加速度, m/s^2
 μ ——颗粒饲料与出料口盘内壁摩擦因数, 取 0.28
 μ_2 ——颗粒饲料间摩擦因数, 取 0.5

整理式(9)可得

$$G(\sin\theta - \mu\cos\theta) + N(\sin\theta - \mu\mu_2\sin\theta - \mu\cos\theta - \mu_2\cos\theta) = ma \tag{11}$$

分析出料口盘结构可知, 出料口盘侧壁倾角与其他结构参数的关系为

$$\tan\theta = \frac{2(H-h)}{d_2 - d} \tag{12}$$

由式(11)、(12)得出料口临界直径 $d > 60 \text{ mm}$, 可避免结拱现象, 本文取 $d = 70 \text{ mm}$, 根据出料口盘、排

料拨片和主轴下定位盘的装配关系及单次下料量的限制,本文取出料口最大直径为 110 mm。

2.2.2 主轴下定位盘

主轴下定位盘配置在出料口盘正下方,并与出料口盘之间形成排料空间。依据饲喂器料斗下方出口结构尺寸与排料要求,将其设计为直径为 140 mm、厚度为 3 mm、三点固定的不锈钢圆盘。

2.2.3 排料拨片

排料拨片配置在出料口盘与主轴下定位盘之间形成的排料空间内,与主轴下定位盘间距为 1 mm,在随主轴旋转时拨送颗粒饲料向饲槽排料。排料拨片具体结构设计如下:旋转直径为 160 mm;厚度为 4 mm;后侧壁为直线形状,此直线通过轴心 O 点,且斜率为 1,考虑排料拨片工作时的强度要求,其两段前侧壁曲线在中心处形成的排料拨片最大宽度 B_1 为 26 mm;前侧壁为排料拨片拨送颗粒饲料的工作区,目前,排料拨片结构形式大都为直线式,由于曲线式排料拨片在工作过程中能够实现连续、均匀、柔和的拨送颗粒饲料,其性能优于直线式;据此本文将其设计为圆弧曲线型,根据排料拨片尖端强度要求及主轴下定位盘结构尺寸,确定曲率半径 $r = 70$ mm,本文对排料拨片前侧壁拨送颗粒饲料过程进行详细分析,如图 4 所示。

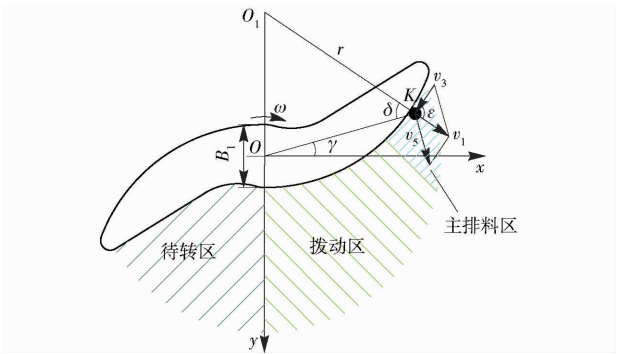


图 4 拨送过程颗粒运动速度分解示意图
Fig. 4 Diagram of particle velocity decomposition

以排料拨片旋转中心 O 为原点,水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴建立定坐标系。为便于分析,依据主轴下定位盘上颗粒饲料受排料拨片作用的特性,将主轴下定位盘单侧区域划分为待转区、拨动区、主排料区(另一侧分区与之相同),排料拨片以顺时针方向转动时,拨动区和待转区内颗粒饲料随排料拨片转动并逐步移向主排料区,最终在排料拨片推送下完成排料过程。为明确经由排料拨片拨送的颗粒饲料运动规律,随机取主排料区内 K 处颗粒饲料分析其速度分布特征。

在 $\triangle O_1OK$ 中,根据余弦定理和正弦定理可得

$$\cos\left(\frac{\pi}{2}-\gamma\right)=\frac{l_{oo_1}^2+l_{ok}^2-r^2}{2l_{oo_1}l_{ok}} \tag{13}$$

$$\frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}-\gamma\right)}{r}=\frac{\sin\delta}{l_{oo_1}} \quad \left(0\leqslant\gamma\leqslant\frac{\pi}{6}\right) \tag{14}$$

其中
$$l_{oo_1}=r-\frac{B_1}{2} \tag{15}$$

式中 γ ——动点 K 的转角, ($^\circ$)
 δ ——动点 K 的牵连速度与相对速度间夹角, ($^\circ$)

解得

$$l_{ok}=-\left(r-\frac{B_1}{2}\right)\sin\gamma+\sqrt{\left(\sin^2\gamma-1\right)\left(r-\frac{B_1}{2}\right)^2+r^2} \tag{16}$$

$$\sin\delta=\frac{\left(r-\frac{B_1}{2}\right)\cos\gamma}{r} \tag{17}$$

在由动点 K 合成的速度三角形中根据正弦定理可得

$$\frac{\sin\varepsilon}{v_3}=\frac{\sin\delta}{v_1} \tag{18}$$

其中
$$v_3=\omega l_{ok} \tag{19}$$

式中 v_1 ——动点 K 的绝对速度, m/s
 v_3 ——动点 K 的牵连速度, m/s
 ω ——排料拨片旋转角速度, rad/s
 ε ——动点 K 的相对速度与绝对速度间夹角, ($^\circ$)

将式(16)、(17)、(19)代入式(18)中可解得

$$\varepsilon=\arcsin\frac{\omega\left(r-\frac{B_1}{2}\right)\left[\left(r-\frac{B_1}{2}\right)\sin\gamma+b\right]\cos\gamma}{rv_1} \tag{20}$$

其中
$$b=\sqrt{r^2-\left(r-\frac{B_1}{2}\right)^2\cos^2\gamma} \tag{21}$$

为实现连续、均匀、分散排料,排料拨片须在主排料区拨送颗粒饲料前移时产生颗粒的切向滑移(沿圆弧曲线),则动点 K 的绝对速度与相对速度间存在夹角 ε ,即绝对速度小于牵连速度。从式(20)可知,主排料区任一点夹角 ε 与角速度、绝对速度有关,常规排料旋转角速度 $\omega = 4.71$ rad/s 时,主轴下定位盘与排料拨片前侧壁交点处颗粒饲料的绝对速度 $v_1 = 0.33$ m/s,可得该点颗粒饲料相对速度与绝对速度间夹角 $\varepsilon = 87.44^\circ$ 。依据上述分析及圆弧曲线特性,拨动区至主排料区内各颗粒饲料相对速度与绝对速度间夹角 ε 逐渐减小,保证颗粒饲料绝对速度方向呈各向异性分布并实现分散排料。

因沿圆弧曲线上每一动点均存在相对速度,因

此圆弧型排料拨片拨动颗粒饲料时各点颗粒饲料的绝对速度较直线式排料拨片均减小,又因

$$\boldsymbol{P}_j = \sum m_j \boldsymbol{v}_j \tag{22}$$

式中 $\boldsymbol{P}_j$ ——各动点动量矢量和,kg·m/s
 m_j —— j 点颗粒饲料质量,kg
 $\boldsymbol{v}_j$ —— j 点颗粒饲料绝对速度,m/s

可知,圆弧型排料拨片较直线型排料拨片推动颗粒饲料更轻柔,此圆弧曲线型排料拨片能够实现连续、柔和的排料过程,而排料拨片转速是影响其抛撒均匀性的关键因素,根据饲喂器的饲喂需求,本文设计单次下料 100 ~ 200 g,即主轴转半圈保证下料量 100 g 在 1 s 内完成。通过数值计算可知主轴转速范围取 30 ~ 60 r/min。

综上所述和由文献[11 - 12,16 - 17]可知,为实现连续、稳定排料以保证饲料质量和提高饲喂器工作性能,饲喂器料斗内颗粒饲料理想流动方式须为整体流,斗壁倾角 β 和出料口直径 d 是影响流动方式的关键因素,且主轴角速度 ω 、出料口直径 d 和料斗充满系数是影响单位时间排料量的关键因素;为获得饲喂器排料性能的影响因素最优组合,以优化饲喂器的关键参数,本文应用 EDEM 仿真软件进行虚拟试验,为后续样机研制与试验奠定基础。

3 EDEM 虚拟正交试验设计与分析

3.1 离散元模型建立

根据保育猪的饲喂需求,本试验选用饲料厂生产的保育猪颗粒饲料为试验材料,其外观形状近似圆柱形,为了真实还原颗粒饲料状态,保证模拟仿真可靠性,利用游标卡尺随机测量 100 粒饲料的几何尺寸,其平均直径为 2.8 mm、平均长度为 6.1 mm,如图 5 所示。



图 5 颗粒饲料形态
Fig. 5 Shape of pellets

由于颗粒几何尺寸差异性大、外观轮廓复杂,大多采用圆颗粒聚合体的方法近似表示真实饲料^[18],为了准确模拟圆柱形颗粒,且达到最优计算精度,圆柱体底面通过 9 个球元来构成^[19],如图 6a 所示。根据实际测得尺寸,在 EDEM 软件的 Particle 模块中输入对应的 x 、 y 、 z 三向坐标建立颗粒饲料圆柱形模型,如图 6b 所示,模拟颗粒饲料个体状态,本文近

似认为颗粒饲料的泊松比、剪切模量、密度等物理参数为定值。

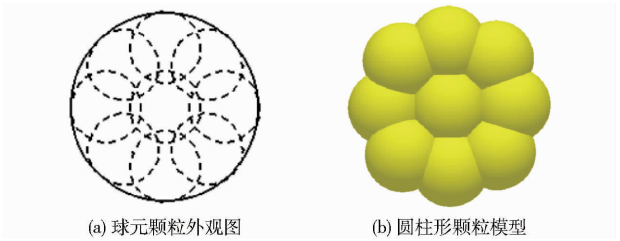


图 6 颗粒仿真模型

Fig. 6 Particle simulation models

为准确对饲喂器料斗内颗粒饲料流动特性进行模拟仿真与分析,应用 Pro/E 软件建立保育猪饲喂器的三维模型,以 .igs 文件格式导入 EDEM2.6 软件中作为 Geometry 模块的颗粒承载体。

3.2 接触模型及仿真参数设置

3.2.1 基本物理及接触参数

应用 EDEM 软件对颗粒饲料进行深入分析时,需设定颗粒饲料与保育猪饲喂器间基本仿真参数。本文利用自制试验平台对颗粒饲料和料斗的物理力学特性和两者相互作用间的接触参数进行测定,具体仿真所需边界参数见表 1。

表 1 材料及接触属性

Tab. 1 Boundary parameters of simulation

参数	P	PVC	S	P - PVC	P - S	P - P
密度/(kg·m ⁻³)	1 064	1 340	7 800			
剪切模量/GPa	0.023	1.2	70			
泊松比	0.36	0.32	0.3			
恢复系数				0.5	0.6	0.62
静摩擦因数				0.4	0.28	0.5
滚动摩擦因数				0.02	0.01	0.01

注:P 表示颗粒,S 表示不锈钢。

3.2.2 接触模型设置

EDEM 软件中提供 6 种接触模型,由于应用的颗粒饲料间无粘附作用,因此 Particle - Particle 间选用 Hertz - Mindlin (no slip) 无滑动接触模型,如图 7 所示。

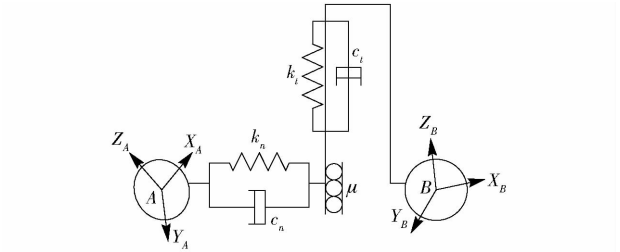


图 7 Hertz - Mindlin 接触模型示意图

Fig. 7 Contact mechanics model sketch of Hertz - Mindlin

3.3 仿真模拟与指标分析

为仿真模拟计算的准确性,根据饲喂器料斗实

际情况,距料斗顶部 60 mm 处创建虚拟工厂不断生成颗粒,待颗粒饲料层到达设定充满系数对应的料斗高度并保持稳定状态时,设置主轴转速,模拟饲喂器料斗内颗粒饲料流动(排料)过程。仿真过程中,设定仿真固定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%,仿真总时间随参数值而确定,数据保存时间为 0.01 s 迭代保存一次。

基于上述分析以及对饲喂器的排料性能要求,本文将变异系数与流量作为饲喂器排料性能的评价指标,用以评价饲喂器的排料均匀性(排料不均会引起保育猪抢食)及其排料能力。

3.3.1 变异系数

根据文献[20-22],为评价饲喂器向饲槽布料的均匀程度,引入变异系数指标,变异系数小于 10% 时饲槽内颗粒饲料分布均匀。为此,本文将饲槽平均分割为 4 部分,利用变异系数比较 4 组数据离散程度。

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu_1} \times 100\%$$

(23)

其中

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^n (m_i - \mu_1)^2 / (n - 1) \right]^{\frac{1}{2}}$$

(24)

$$\mu_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$$

(25)

式中 C_v ——变异系数,%
 σ ——每次试验饲槽中各部分颗粒质量标准差,kg
 μ_1 ——每次试验饲槽中各部分颗粒质量均值,kg
 n ——饲槽被割分数量,个
 m_i ——每次试验饲槽中各部分颗粒质量,kg

3.3.2 流量

流量为单位时间内下落至饲槽内颗粒饲料的质量,根据保育猪每日的必需采食量及饲喂器供采食猪只头数,推算单位时间内保证排料量在 100 ~ 200 g/s 之间,本文用其评价饲喂器排料能力。

本文通过 EDEM 软件 Binning 模块建立一个 Grid bin group(网格状方格组)以选中饲槽区域,依据传感器报警时监测距离,测定此时颗粒饲料总质量,计算得到流量。

3.4 虚拟试验设计方案

依据文献[16,23]可知,饲喂器料斗内颗粒饲料在排料时实现整体流能保证喂饲的饲料质量(实现饲料先进先出)和向饲槽布料过程的连续进行(防止饲料结拱)。基于以上分析,选取影响饲喂器排料性能的关键因素——主轴转速、出料口直径、斗壁倾角、充满系数为试验因素,以变异系数和流量为试验指标,设定试验因素水平如表 2 所示。

表 2 试验因素水平
Tab.2 Experimental factors and levels

水平	因素			
	主轴转速 $n/$	出料口直径	斗壁倾角	充满系数
	($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	d/mm	$\beta/(\text{ }^\circ)$	$\eta/\%$
1	30	70	35	50
2	45	90	50	65
3	60	110	65	80

在上述基础上,为获得影响饲喂器排料性能的理想参数组合,以前期建立的虚拟模型为研究载体,选取 $L_{27}(3^{13})$ 正交表进行 EDEM 虚拟正交试验,具体试验方案与结果如表 3 所示, A 、 B 、 C 、 D 分别为主轴转速、出料口直径、斗壁倾角、充满系数因素水平值。

表 3 试验方案与结果
Tab.3 Experimental plan and results

序号	试验因素				试验指标	
	A	B	C	D	变异系数 $C_v/\%$	流量 $Q/$ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	1	1	1	1	4.98	107.29
2	1	1	1	1	5.98	120.51
3	1	1	1	1	4.03	109.23
4	1	2	2	2	4.02	142.16
5	1	2	2	2	3.84	147.34
6	1	2	2	2	3.46	150.59
7	1	3	3	3	2.78	135.49
8	1	3	3	3	3.95	129.46
9	1	3	3	3	3.15	140.13
10	2	1	2	3	5.05	121.34
11	2	1	2	3	5.20	112.89
12	2	1	2	3	5.69	118.21
13	2	2	3	1	5.72	130.21
14	2	2	3	1	5.05	116.36
15	2	2	3	1	4.59	120.01
16	2	3	1	2	4.52	180.17
17	2	3	1	2	4.81	169.75
18	2	3	1	2	4.69	172.32
19	3	1	3	2	6.46	139.46
20	3	1	3	2	6.01	130.69
21	3	1	3	2	6.51	129.26
22	3	2	1	3	7.19	130.19
23	3	2	1	3	6.98	122.61
24	3	2	1	3	7.05	133.28
25	3	3	2	1	6.14	145.32
26	3	3	2	1	6.21	155.94
27	3	3	2	1	6.09	142.23
C_v	K_1	36.19	49.91	50.23	48.79	
	K_2	45.32	47.90	45.70	44.32	
	K_3	58.64	42.34	44.22	47.04	
	R	22.45	7.57	6.01	4.47	
Q	K_1	1 182.20	1 088.88	1 245.35	1 147.10	
	K_2	1 241.26	1 192.75	1 236.02	1 361.74	
	K_3	1 228.98	1 370.81	1 171.07	1 143.60	
	R	59.06	281.93	74.28	218.14	

3.5 虚拟试验结果分析

在满足实际饲喂要求范围内,其变异系数越小,流量越大,能保证饲槽中颗粒饲料分散均匀,保育猪饲喂器工作效率越高、布料效果越好。由表 3 极差分析可知,影响变异系数的因素主次顺序为:主轴转速、出料口直径、斗壁倾角、充满系数,较优参数组合为 $A_1B_3C_3D_2$;影响流量的因素主次顺序为:出料口直径、充满系数、斗壁倾角、主轴转速,较优参数组合为 $A_1B_1C_3D_3$,根据预试验及饲喂器工作特点,确定影响饲喂器综合排料性能的主次顺序为:主轴转速、

出料口直径、斗壁倾角、充满系数。

为了验证上述各因素对试验指标影响显著性的准确性,运用 Design-Expert 8. 0. 10 软件对正交试验数据进行方差分析,如表 4 所示,主轴转速和出料口直径对变异系数影响极显著 ($P < 0. 01$),斗壁倾角对变异系数影响显著 ($P < 0. 05$),充满系数对变异系数影响较显著 ($P < 0. 10$);出料口直径和充满系数对流量影响极显著 ($P < 0. 01$),斗壁倾角对流量影响显著 ($P < 0. 05$),主轴转速对流量影响较显著 ($P < 0. 10$),即符合上述极差分析规律。

表 4 方差分析
Tab. 4 Variance analysis

试验指标	方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	显著性
变异系数	<i>A</i>	29. 04	2	14. 52	68. 88	< 0. 000 1	***
	<i>B</i>	3. 40	2	1. 70	8. 07	0. 003 1	***
	<i>C</i>	2. 12	2	1. 06	5. 02	0. 018 5	**
	<i>D</i>	1. 47	2	0. 74	3. 50	0. 052 1	*
	残差	3. 80	18	0. 21			
	总和	38. 92	26				
流量	<i>A</i>	204. 97	2	102. 48	2. 98	0. 076 5	*
	<i>B</i>	4 440. 12	2	2 220. 06	64. 46	< 0. 000 1	***
	<i>C</i>	343. 49	2	171. 75	4. 99	0. 018 9	**
	<i>D</i>	3 455. 14	2	1 727. 57	50. 16	< 0. 000 1	***
	残差	619. 98	18	34. 44			
	总和	9 185. 09	26				

注: ***表示极显著 ($P < 0. 01$), **表示显著 ($P < 0. 05$), *表示较显著 ($P < 0. 10$)。

为得到最优参数组合,基于 Design-Expert 8. 0. 10 软件对模型进行多目标优化,以各因素、指标所建立的不等式约束函数为求优条件,综合分析得到最优参数组合为 $A_2B_3C_3D_2$,即当主轴转速、出料口直径、斗壁倾角和充满系数分别为 45 r/min、110 mm、65°和 65%时,变异系数为 3. 96%、流量为 165. 93 g/s。根据软件得到的最优组合进行虚拟仿真验证,其变异系数和流量分别为 3. 47% 和 154. 98 g/s,与优化结果基本一致。

4 排料单元与样机试验

4.1 基于 EDEM 排料单元性能试验

为验证理论分析结果,应用 EDEM 软件对排料拨片拨送颗粒饲料运动过程进行虚拟仿真,其中几何结构尺寸为上述最优参数组合。本文以稳定排料过程中某一瞬时为例分析排料拨片对颗粒饲料的作用,如图 8 所示。图中蓝色代表最低速,红色代表最高速,箭头表示颗粒饲料运动方向。

由图 8 可知,颗粒饲料群呈各向异性发散分布,主排料区的颗粒饲料基本沿圆弧曲线法向离开主轴下定位盘;拨动区内颗粒饲料的绝对速度方向呈规

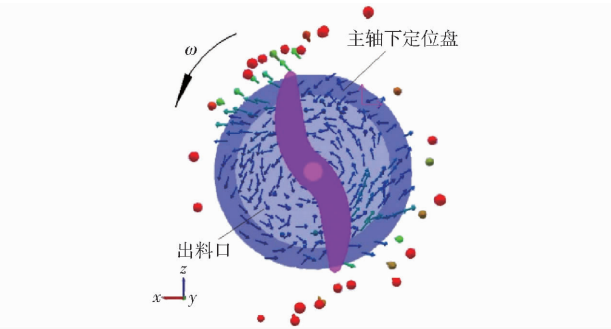


图 8 虚拟拨料瞬时状态

Fig. 8 State of virtual discharging process

律性变化,上述现象与理论分析基本一致,证明圆弧曲线型排料拨片设计合理。

4.2 样机试验

按照上述研究确定的最优参数:出料口直径 110 mm、斗壁倾角 65°,优化设计的保育猪饲喂器结构(其它参数见前文总体结构设计)。为检验理论与仿真分析的可行性,采用如下最优参数组合:主轴转速 45 r/min 和充满系数 65% 进行试验研究。试验地点为东北农业大学畜牧机械实验室,试验材料为平均直径 2. 8 mm、平均长度 6. 1 mm 的颗粒饲料,试验装置为保育猪饲喂器试验台,如图 9 所示,试验

仪器设备包括索尼 ILCE - 7M2K 型全画幅微单相机、天平、秒表等。

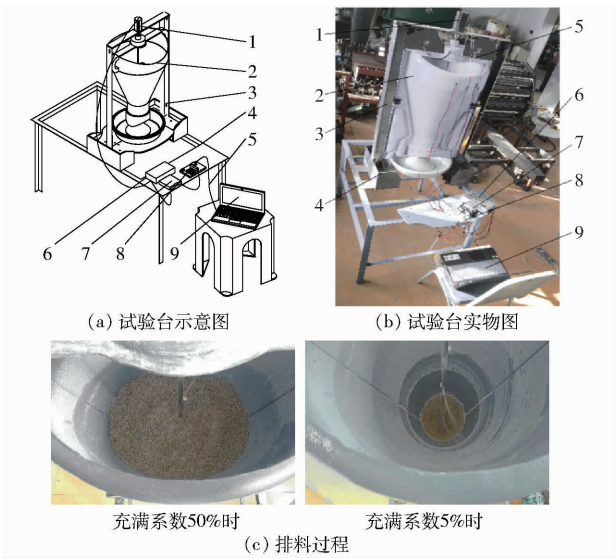


图 9 样机试验

Fig. 9 Prototype tests

1. 电动机 2. 饲喂器 3. 支架 4. 底座 5. 导线 6. 电源 7. 驱动器 8. 单片机 9. 计算机

为便于测量,预先用薄片将饲槽划分 4 部分,在样机试验研究过程中,保证饲喂器料斗内颗粒饲料充满系数为 65%,通过旋转电位器调节电动机转速至 45 r/min,利用索尼 ILCE - 7M2K 型全画幅微单相机正对料斗进料口方向,实时记录保育猪饲喂器的流料过程,并用秒表计时器同步记录,试验结束后对饲槽内各部分质量进行测量,将数据代入式(23)求解变异系数;并根据一定时间饲槽内颗粒饲料总质量换算得到流量。为减小试验误差,重复 5 次试验取平均值,相关指标测量数据结果如表 5 所示。

参 考 文 献

1 陈安国. 猪用干湿饲喂器的设计原理及应用技术参数研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
CHEN Anguo. Studies on design theory and application technology of wet/dry feeders for swine [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)

2 邹远炳, 孙龙清, 李玥, 等. 基于分布式流式计算的生猪养殖视频监测分析系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 365 - 373. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s056&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.056.
ZOU Yuanbing, SUN Longqing, LI Yue, et al. Video monitoring and analysis system for pig breeding based on distributed flow computing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 365 - 373. (in Chinese)

3 黄瑞森, 陈君梅, 陈永志, 等. 一种智能喂料器的设计及其控制方法[J]. 现代农业装备, 2015(4): 45 - 49.

4 MAGOWAN E, MEE M C, O'CONNELL N E. The effect of feeder type and change of feeder type on growing and finishing pig performance and behaviour [J]. Animal Feed Science & Technology, 2008, 142(1): 133 - 143.

5 NIELSEN B L, LAWRENCE A B, WHITTEMORE C T. Feeding behaviour of growing pigs using single or multi-space feeders [J]. Applied Animal Behaviour Science, 1996, 47(3): 235 - 246.

6 陈安国, 陶朝辉. 生长猪自动干湿饲喂器应用效果的研究[J]. 饲料工业, 2001, 22(12): 35 - 36.

7 麦永强. 智能猪用干湿料饲喂器的研制[J]. 现代农业装备, 2014(4): 33 - 36.

8 MAITI R, DAS G, DAS P K. Experiments on eccentric granular discharge from a quasi-two-dimensional silo [J]. Powder Technology, 2016, 301: 1054 - 1066.

9 ZHANG Y, JIA F, ZENG Y, et al. DEM study in the critical height of flow mechanism transition in a conical silo [J]. Powder

表 5 验证试验结果

Tab.5 Verification test results

序号	流动方式	变异系数/%	流量/(g·s ⁻¹)
1	整体流	4.71	149.13
2	整体流	2.79	148.77
3	整体流	3.16	148.40
4	整体流	2.40	150.22
5	整体流	5.05	149.13
均值		3.62	149.13

由表 5 可知,保育猪饲喂器饲槽内颗粒饲料分布均匀且排料效率较高,其变异系数相对误差为 4.14%,流量相对误差为 3.92%。验证结果与优化结果基本一致,证明理论分析与仿真试验可为保育猪饲喂器的优化设计提供指导与参考。

5 结论

(1)通过分析确定影响饲喂器排料性能的关键因素为主轴转速、出料口直径、斗壁倾角和充满系数,排料性能评价指标为变异系数和流量。

(2)运用 EDEM 软件进行虚拟正交试验,结果表明:影响饲喂器排料性能的因素主次顺序为主轴转速、出料口直径、斗壁倾角、充满系数;最优参数组合为主轴转速 45 r/min、出料口直径 110 mm、料斗倾角 65°和充满系数 65%,此时,变异系数和流量分别为 3.96% 和 165.93 g/s。

(3)保育猪饲喂器样机试验表明,试验结果与仿真优化结果基本一致,变异系数和流量的相对误差分别为 4.14% 和 3.92%,研制的饲喂器排料质量均衡且作业效率较高,满足保育猪的采食要求。

- Technology, 2018, 331: 98 – 106.
- 10 WEINHART T, LUDING S, LABRA C, et al. Influence of coarse-graining parameters on the analysis of DEM simulations of silo flow[J]. Powder Technology, 2016, 293: 138 – 148.
- 11 陶贺, 钟文琪, 张勇, 等. 异形混合非球形颗粒在移动床中流动特性的数值模拟[J]. 科学通报, 2015, 60(27): 2667 – 2675.
- TAO He, ZHONG Wenqi, ZHANG Yong, et al. Numerical simulation of flow characteristics for non-spherical particle mixture flowing in moving bed[J]. Science Bulletin, 2015, 60(27): 2667 – 2675. (in Chinese)
- 12 王学文, QIN Yi, TIAN Yankang, 等. 基于 EDEM 的煤仓卸料时煤散料流动特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 130 – 134.
- WANG Xuewen, QIN Yi, TIAN Yankang, et al. Analysis on flow features of bulk coal during coal unloading period based on EDEM[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 130 – 134. (in Chinese)
- 13 代林波. 母猪精确饲喂装置的设计与仿真分析研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
- DAI Linbo. Design and simulation analysis of sow accurate feeding device[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012. (in Chinese)
- 14 薛勇. 筒仓中贮料结拱原因及其理论分析[J]. 郑州粮食学院学报, 1991(3): 95 – 99.
- XUE Yong. The cause and theoretical analysis of stock bridging in silo[J]. Journal of Zhengzhou Grain College, 1991(3): 95 – 99. (in Chinese)
- 15 张翀, 舒赣平. 筒仓卸料的颗粒流模拟及仓壁侧压力研究[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(4): 11 – 16.
- ZHANG Chong, SHU Ganping. Simulation of silo discharge in particle flow code and research of solids pressure on silo wall[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(4): 11 – 16. (in Chinese)
- 16 陈长冰. 基于整体流型的粉体料仓设计分析[J]. 化工设备与管道, 2006, 43(3): 34 – 38.
- CHEN Changbing. Design and analysis of silos with mass flow[J]. Process Equipment & Piping, 2006, 43(3): 34 – 38. (in Chinese)
- 17 李利桥, 王德福, 李超, 等. 转筒与桨叶组合式日粮混合机设计与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 67 – 75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171008&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.008.
- LI Liqiao, WANG Defu, LI Chao, et al. Design and experimental optimization of combined-type ration mixer of drum and blade[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 67 – 75. (in Chinese)
- 18 刘月琴, 赵满全, 刘飞, 等. 基于离散元的气吸式排种器工作参数仿真优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 65 – 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160710&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.010.
- LIU Yueqin, ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Simulation and optimization of working parameters of air suction metering device based on discrete element[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 65 – 72. (in Chinese)
- 19 陶贺, 钟文琪, 金保昇. 采用多元颗粒模型对圆柱形颗粒在移动床中流动的离散单元法直接数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 13 – 19, 137.
- TAO He, ZHONG Wenqi, JIN Baosheng. Discrete element modeling of cylindrical particle flowing in the moving bed by multi-element particle model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(17): 13 – 19, 137. (in Chinese)
- 20 王德福, 李超, 李利桥, 等. 叶板式饲料混合机混合机理分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 98 – 104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171211&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.011.
- WANG Defu, LI Chao, LI Liqiao, et al. Mechanism analysis and parameter optimization of blade-type feed mixer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 98 – 104. (in Chinese)
- 21 王德福, 蒋亦元. 双轴卧式全混合日粮混合机的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 85 – 88.
- WANG Defu, JIANG Yiyuan. Experimental study on the twin-shaft horizontal total mixed ration mixer[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(4): 85 – 88. (in Chinese)
- 22 李利桥, 王德福, 李超. 回转式日粮混合机混合机理分析与性能试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 123 – 132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.013.
- LI Liqiao, WANG Defu, LI Chao. Mixing process analysis and performance experiment of rotary ration mixer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 123 – 132. (in Chinese)
- 23 王乾. 煤粉仓整体流主动活化系统的研究[J]. 煤矿机械, 2014, 35(6): 39 – 41.
- WANG Qian. Study on initiative activating system of overall flow of silo[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(6): 39 – 41. (in Chinese)