

精准配比料药一体化生猪饲喂器设计与试验

闫银发^{1,2} 刘冠鲁¹ 宋占华^{1,2} 田富洋^{1,3} 李法德^{1,3} 刘莫尘^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对向生猪饲料中添加颗粒药物时药物分布不均导致的药物利用率低的问题,设计了一种精准配比料药一体化饲喂器,以计量式斜槽轮为排料装置,并对排料斜槽轮、排药斜槽轮、饲料分流刀等关键部件进行了设计和仿真,实现给定质量比范围内的实时精准加药。用离散元分析软件 EDEM 进行排料稳定性分析,得出转速为 40 ~ 60 r/min 时排料槽轮的稳定性较好,根据 (100 ~ 250):1 的料药质量配比确定排药槽轮转速为 10 ~ 20 r/min。用力链分析饲料颗粒和药物颗粒在斜槽轮排料装置工作时的受力情况,可知饲料颗粒和药物颗粒所受的外力小于破碎力,两种颗粒在整个运动过程中所受的外力不会造成颗粒破碎。通过样机试验测得在给定转速范围内,可实现的料药质量配比范围为 (93.4 ~ 251.8):1,给定的料药质量配比在此范围内;进行料药配比混合台架试验,试验结果表明精准配比料药一体化饲喂器能实现向饲料中实时精准加药,解决了小粒径小流量的药物颗粒在大粒径大流量的饲料颗粒中分布不均匀问题。

关键词: 生猪; 料药一体饲喂器; 精准配比; 斜槽轮排料器; 离散元; 变异系数

中图分类号: S817.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0142-08

Design and Experiment of Pig Feeding Device with Accurate Proportioning of Feed and Drug

YAN Yinfa^{1,2} LIU Guanlu¹ SONG Zhanhua^{1,2} TIAN Fuyang^{1,3} LI Fade^{1,3} LIU Mochen^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China
3. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: Focusing on the problem of low drug utilization caused by uneven drug distribution when adding granular drugs to pig feed, a precise feed and drug integrated feeder was designed, with a metering inclined flute-wheel as the discharge device, and key components were designed to achieve real-time and accurate dosing under a given mass ratio range. Using the discrete element analysis software EDEM 2018 for discharge stability analysis, it was found that the stability of the feed discharge flute-wheel was good when the speed was 40 ~ 60 r/min. Based on the (100 ~ 250):1 material and drug mass ratio, the drug discharge flute-wheel speed was determined to be 10 ~ 20 r/min. The force chain analysis showed that the external force acting on feed particles and drug particles during the operation of the flute-wheel discharge device were smaller than the crushing force, and it would not cause particle breakage during the entire movement process. Through prototype testing, it was found that within the given speed range, the achievable material and drug mass ratio range was (93.4 ~ 251.8):1, and the given material and drug mass ratio was within this range. A bench test was conducted on the feed and drug ratio, and the experimental results showed that the precise feed and drug integrated feeder can achieve real-time and precise dosing into the feed, solving the problem of uneven distribution of small particle size and small flow rate drug particles in large particle size and large flow rate feed particles.

Key words: pig; feed and drug feeder; accurate matching; incline flute-wheel; discrete element; coefficient of variation

收稿日期: 2023-05-26 修回日期: 2023-08-24

基金项目: 山东省重点研发计划(乡村振兴科技创新提振行动计划)项目(2022TZXD0014)

作者简介: 闫银发(1976—),男,教授,主要从事智能农机装备研究,E-mail: yanyinfa@sdau.edu.cn

通信作者: 刘莫尘(1980—),女,副教授,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: liu_mochen@126.com

0 引言

随着物联网和智能化技术的不断发展,以自动化环控、机械化饲喂为主要特点的规模化猪场逐渐兴起,同时精准饲喂也成了猪场提质增效的主要途径之一^[1]。现如今给生猪在饲料中加药饲喂是常用的疫病防控手段。有效地对生猪的疫病进行预防和治疗,既能够保证人们的饮食安全,也可以提升生猪养殖户的经济效益^[2]。目前人工添加药物到料线的防控方式因饲料颗粒和药物颗粒的粒径、用量均相差过大和料线输送距离过长的影响会造成药物分配不均和药物沉积的问题,使得药物利用率低。

国内外的研究人员对畜类养殖过程中的精准饲喂技术以及自动饲喂设施设备进行研究,以期实现精准饲喂,提高饲料的利用率。POMAR 等^[3]开发了一个基于主体的模拟框架,为后续设计、测试新型自动化精准饲喂设备提供了软件支持。加拿大 Rovibec 公司研制的 DEC HDR 吊轨式饲喂机器人采用机械搅拌和传送带投料的饲喂方式对养殖场内的奶牛进行饲喂^[4]。丹麦 Master Trading 公司生产的干湿饲喂器采用干湿饲喂方式对生猪进行饲喂,此种干湿饲喂器的优点在于围栏型排料单元可实现猪只的无死角触碰,采食效率较高^[5]。

随着国内生猪养殖的规模不断扩大,饲喂机器人等智能化产品的研发和应用水平也有较大提高^[6]。熊本海等^[7]研制出哺乳母猪精准饲喂下料控制系统,通过控制电动杆与嵌入式系统的协调工作获得稳定的下料量,适用于大、中、小型的种猪场。闫银发等^[8]研制了一种槽轮式补饲机,用离散元分析的方法研究了槽轮式排料器在不同转速下颗粒群的速度分布和运动规律,实现了不同饲料颗粒的均匀掺混。单虎等^[9]设计了一种带加药器的猪用饮水装置,能同时进行片状固体药片和液体药剂的饮水加药,避免了单一加药装置的局限性。黄淑兴^[10]设计了一种料线加药装置,通过在料线输送管上设置料线加药器,采用机械搅拌的方式将药物加入到料线中,降低了人工成本。

综合国内外研究现状可发现,国内外饲喂器对畜类饲喂一般采用机械搅拌的方式,利用颗粒流的自然流动碰撞进行实时掺混的机械较少^[11];以机械搅拌的方式向料线中加入颗粒药物时,药物会因输送距离的增加逐渐沉积到管道底部,导致药物利用率低。因此,研制一种能根据畜类个体的需料量和需药量在饲料内进行实时精准加药的饲喂器,对畜类的疫病防控具有重要意义。本文以斜槽轮排料器作为计量排料装置,设计一种精准配比料药一体化

饲喂器,以实现粒径、用量都差异较大的饲料颗粒和药物颗粒的实时精准配比加药。

1 精准配比料药一体化饲喂器整机结构与工作原理

1.1 样机结构

精准配比料药一体化饲喂器主要由机架、料仓、药仓、斜槽轮计量排料装置、饲料分流刀、输料管、输药管、步进电机及其驱动器、控制系统等组成,搭建的台架试验样机如图 1 所示。

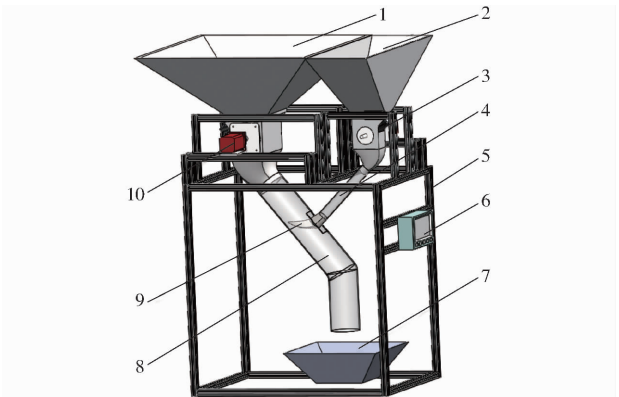


图 1 精准配比料药一体化饲喂器台架试验样机结构图

Fig. 1 Prototype diagram of precise proportioning feed and drug integrated intelligent feeder bench test

1. 料仓 2. 药仓 3. 毛刷 4. 输药管 5. 机架 6. 料药配比控制器 7. 集料仓 8. 输料管 9. 饲料分流刀 10. 步进电机

1.2 工作原理

根据不同的料药质量配比,向料药配比控制器中分别输入排料斜槽轮和排药斜槽轮的转速,控制器发送不同频率的 PWM 脉冲驱动 2 个步进电机分别带动 2 个斜槽轮以相应的转速旋转,排出的饲料和药物在重力作用下落入到输料管和输药管内,输药管末端的饲料分流刀将输料管中的饲料分流,药物颗粒落入到分流后的饲料流中随饲料流一起落入到集料仓内,完成料药配比混合。

2 关键部件设计

2.1 斜槽轮排料装置和排药装置设计

为减少排料的波动、保障 2 种颗粒排放的稳定性,根据 JB/T 9783—2013《对外槽轮排种(肥)器的设计》要求并查阅《农业机械设计手册》^[12],排料装置选用斜槽轮。育肥猪舍内一般每栏养殖 20 ~ 30 头猪,每头猪每日饲喂 3 ~ 4 次,日采食量 2.1 ~ 2.6 kg^[13],计算得每头猪次采食量约为 700 g,每栏育肥猪需料量约为 21 kg。设计的斜槽轮排料装置结构如图 2a 所示^[8]。为满足养殖场对育肥猪饲喂的需求,对两个斜槽轮结构参数进行设计。斜槽轮

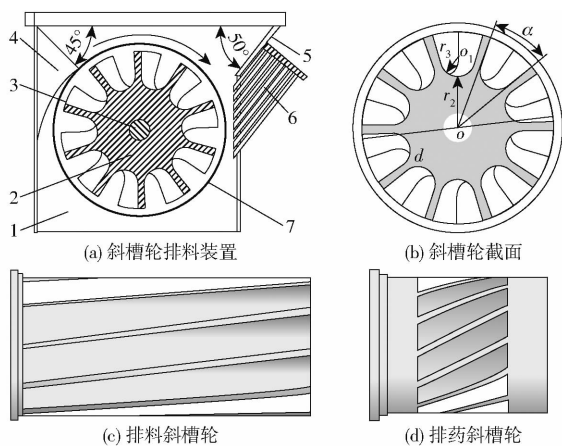


图2 斜槽轮排料器及斜槽轮截面示意图

Fig. 2 Schematics of inclined flute-wheel discharger and inclined flute-wheel section

1. 排料盒 2. 斜槽轮 3. 排料轴 4. 挡板 5. 毛刷固定板 6. 毛刷 7. 斜槽轮固定盘

的横截面剖面图如图2b所示,锥形圆弧凹槽的横截面积 A 计算公式为

$$A = \frac{d^2}{8}\alpha + \frac{r_3^2}{2}(\pi - \alpha) - (r_2 + r_3)^2 \sin \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \alpha = \frac{2\pi}{z} \quad (2)$$

$$r_3 = \frac{d \sin \frac{\alpha}{2}}{4 \left(1 - \sin \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (3)$$

式中 d ——斜槽轮直径, mm
 α ——相邻锥形圆弧凹槽之间截距角, rad
 r_2 ——锥形圆弧凹槽齿根圆半径, mm
 r_3 ——锥形圆弧凹槽半径, mm
 z ——锥形圆弧凹槽数

则斜槽轮单转排料量 q 可表示为

$$q = \pi d L \rho \left(\frac{\psi z A}{\pi d} + \lambda \right) \quad (4)$$

式中 q ——斜槽轮单转排料量, g
 L ——斜槽轮工作长度, mm
 ρ ——颗粒容重, g/mm³
 ψ ——斜槽轮填充系数^[14]
 λ ——带动层特性系数, 取 0.3

以上述公式为基础对两个斜槽轮的结构参数进行设计^[11], 本文设计的排料斜槽轮直径为 80 mm, 工作长度为 200 mm, 锥形圆弧凹槽数为 10, 凹槽半径为 8 mm, 凹槽齿根圆半径为 22 mm; 以甘草颗粒料药质量配比范围(100 ~ 250): 1 为参照, 设计排药斜槽轮直径为 40 mm, 工作长度为 28 mm, 锥形圆弧凹槽数为 13, 凹槽半径为 4 mm, 凹槽齿根圆半径为 16.5 mm。为使颗粒能稳定排出, 排料斜槽轮倾角

定为 30°, 排药斜槽轮倾角定为 40°^[15-18], 斜槽轮长度也可以根据排料量进行设定。图 2c、2d 为排料斜槽轮、排药斜槽轮三维模型。

2.2 饲料分流刀的设计

为使小粒径小流量的药物颗粒能进入到大粒径大流量的饲料流内部, 需要一个工具将输料管内的饲料流分开, 使药物颗粒能落到分开后的饲料流内部随饲料流一起运动。根据此需求设计饲料分流刀并将其安装在输药管末端, 其结构如图 3 所示。

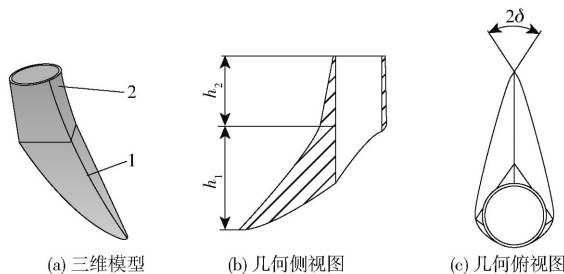


图3 饲料分流刀结构图

Fig. 3 Structure diagrams of feed splitter knife

1. 饲料分流刀 2. 连接件

根据输料管内径设计饲料分流刀高度 h_1 为 60 mm, 连接件高度 h_2 为 40 mm, 设计饲料分流刀推料角 δ 为 35°。为减少在分流时因阻力过大而产生的粉尘和减轻因分流时阻力过大而发生的堵塞现象, 对饲料分流刀刀口导曲线进行仿生设计。因为小家鼠爪趾纵剖面上表面轮廓线具有减小阻力的作用, 且具有指数型特征^[19], 所以将小家鼠爪趾轮廓拟合曲线应用于饲料分流刀刀口导曲线上, 拟合曲线方程为

$$Y = -66.61e^{0.0117X} + 17.78e^{-0.1835X} \quad (5)$$

在输料管中间位置开孔, 将输药管插入输料管中, 如图 4 所示。其中 D_1 为输料管内径, D_2 为输药管内径, l 为输料管长度, Φ 为输料管与竖直方向夹角, θ 为输料管与输药管之间的夹角。为保证颗粒流不在管道内发生堵塞, 根据测定的饲料颗粒与管道壁材料的静摩擦因数 0.510、动摩擦因数 0.326, 药物颗粒与管道壁材料的静摩擦因数为 0.493, 动摩擦因数为 0.274, 本样机设计输料管内径为 84 mm, 长为 400 mm, 与竖直方向夹角为 40°; 输药管内径为 25 mm, 长为 210 mm, 输料管与输药管之间夹角 θ 取值范围为 80° ~ 90°。

3 试验材料参数测定及离散元模型建立

3.1 饲料和药物颗粒参数测定

本试验采用颗粒饲料和颗粒药物为试验材料。试验以育肥猪饲料(福建傲农生物科技集团股份有限公司)、甘草颗粒(合肥中龙神力动物药业有限公

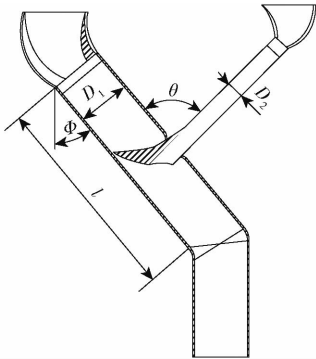
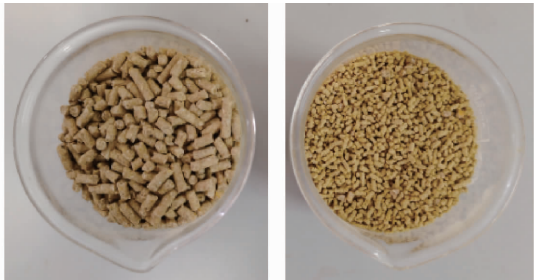


图 4 输料管和输药管剖面图

Fig. 4 Sectional view of feed and drug delivery pipes

司)的用法用量为例,料药质量配比为(100~250):1,两种颗粒如图 5 所示。对饲料和药物颗粒的物料特性参数进行测定,结果如表 1 所示。



(a) 饲料颗粒 (b) 药物颗粒

图 5 饲料和药物颗粒实物图

Fig. 5 Physical images of feed and drug particles

表 1 饲料和药物颗粒的物料特性参数

Tab.1 Material characteristic parameters of feed and drug particles

参数	饲料	药物
容重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	720 ± 5	500 ± 5
泊松比	0.25	0.25
剪切模量	1.0×10^7	1.0×10^7
颗粒间恢复系数	0.23	0.18
颗粒间静摩擦因数	0.714	0.750
颗粒间动摩擦因数	0.431	0.482
颗粒与壁恢复系数	0.425	0.328
颗粒与壁静摩擦因数	0.510	0.493
颗粒与壁动摩擦因数	0.326	0.274

在常温(25℃)情况下分别称取 100 g 饲料颗粒和药物颗粒,利用 ZTXY-101 型水分测定仪(常州市幸运电子设备有限公司)通过计算干燥前后质量差的方法计算两种颗粒的含水率,每种颗粒重复测量 3 次并求平均值,测得饲料颗粒和药物颗粒的含水率分别为 2.73% 和 3.86%;在此条件下随机选取饲料颗粒和药物颗粒各 10 粒,利用 WDW-5E 型万能试验机(济南试金集团有限公司)测定两种颗粒的破碎力并各求其平均值,测得饲料颗粒和药物颗粒的平均破碎力分别为 54 N 和 10 N。

3.2 离散元模型建立

根据测定的饲料和药物颗粒的物料特性参数在 EDEM 2018 软件中建立两种颗粒的离散元模型。由于两种颗粒本身的长、宽、高等外形尺寸差异较大,因此在进行仿真试验时采用圆颗粒聚合成圆柱的方式对圆柱型饲料和药物颗粒建立仿真模型,试验测得饲料颗粒长、宽、高平均值分别为 10.943、4.266、4.174 mm,药物颗粒长、宽、高平均值分别为 2.713、1.523、1.474 mm,建立的饲料、药物颗粒模型如图 6a、6b 所示。

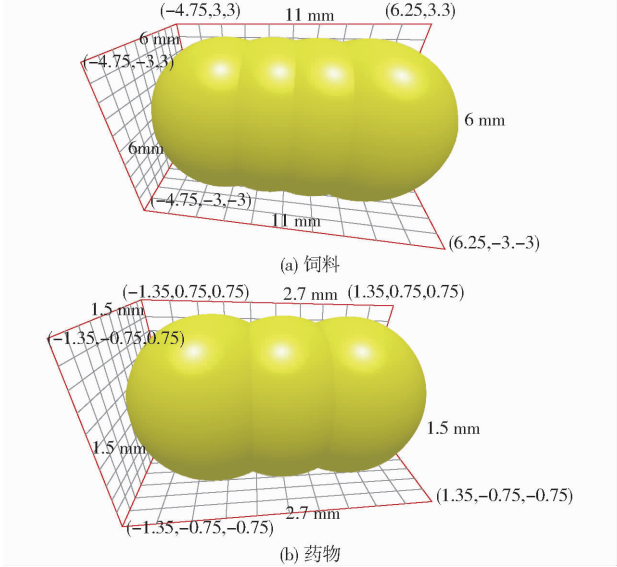


图 6 饲料和药物颗粒离散元仿真模型

Fig. 6 Discrete element simulation models of feed and drug particles

4 颗粒运动离散元分析

4.1 颗粒运动离散元仿真

为研究经饲料分流刀分流后饲料的均匀性和排药槽轮的排药稳定性,对两个斜槽轮的工作过程分别进行离散元仿真。由槽轮的工作原理可知,转速对排料量精度有着显著性影响^[14],为探究槽轮的转速与排料(药)精度的关系,根据表 1 对 EDEM 中的颗粒参数进行设定,颗粒之间是常规颗粒的接触力作用,用 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型对两种颗粒进行离散元仿真^[20-22]。为模拟实际工作过程,观察两种颗粒在饲料槽内的分布情况,在距离排料口下端 200 mm 的位置设置一块长 2 000 mm、宽 300 mm 的长方体用来模拟饲料槽。此过程研究单个斜槽轮的排料(药)精度,因此每次仿真只生成一种颗粒,如图 7 所示。

根据实际需料量和给定料药质量配比范围,在仿真时设定排料斜槽轮转速范围为 20~80 r/min,转速增量为 10 r/min;设定排药斜槽轮转速范围为

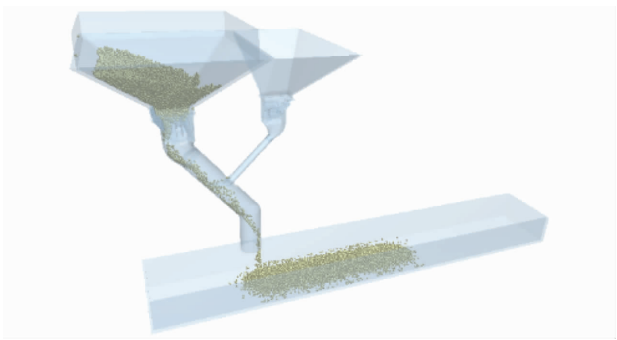


图 7 排料仿真

Fig.7 Simulation of feed discharge

10 ~ 40 r/min, 转速增量为 5 r/min, 每个转速下仿真时长均为 15 s。

4.2 排料性能评价

仿真结束后, 为方便对排料(药)性能进行评价, 采用排料(药)均匀度变异系数作为排料斜槽轮排料性能的评价指标。选取模拟饲料槽 1 500 mm 的区域作为取样区域, 用 EDEM 软件后处理 Setup Selections 功能中的 Grid Bin Group 将该区域横向均匀划分为 10 个单元格, 每个网格尺寸为 150 mm × 300 mm × 100 mm, 并通过 Number of Particles 功能对每个单元格内的饲料颗粒和药物颗粒的数量进行统计, 进而根据 EDEM 中给出的颗粒单粒质量分别计算每个单元格中两种颗粒的质量和所有单元格内颗粒的总质量。据此计算两个斜槽轮的排料(药)变异系数^[23], 公式为

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \overline{m})^2}{n - 1}}}{\overline{m}} \times 100\% \tag{6}$$

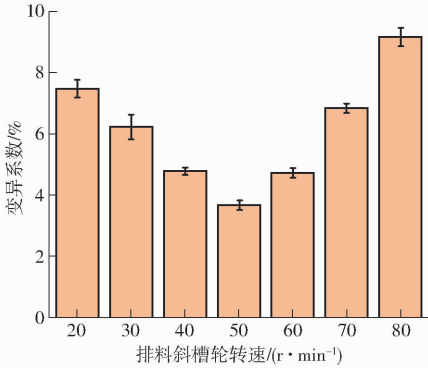
其中
$$\overline{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \tag{7}$$

式中 m_i ——第 i 个单元格内的颗粒质量, g
 $\overline{m}$ ——单元格内颗粒的平均质量, g
 n ——单元格数量, n 取 10

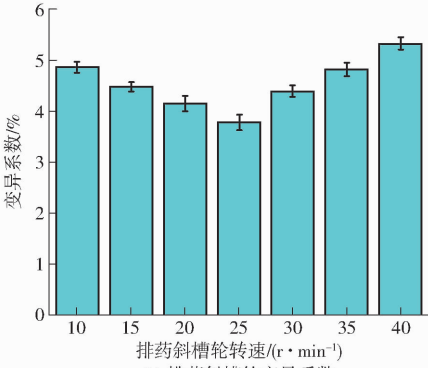
σ 越小, 代表斜槽轮工作的稳定性和均匀性越好。在每个转速下分别对两个斜槽轮的工作过程进行仿真后对它们的排料(药)均匀性进行分析, 得到两个斜槽轮的排料排药变异系数分别如图 8a、8b 所示。

由图 8a 可知, 在转速为 40 ~ 60 r/min 范围内排料斜槽轮的排料变异系数在 5% 以内, 在此转速范围工作时排料斜槽轮具有较高的排料精度和排料稳定性。通过计算得, 在转速为 40 ~ 60 r/min 范围内, 设计的排料斜槽轮能在 75 s 内完成对一栏猪的饲料投喂, 具有较高的作业效率。

由图 8b 可知, 在转速为 10 ~ 35 r/min 时, 排药



(a) 排料斜槽轮变异系数



(b) 排药斜槽轮变异系数

图 8 不同转速下槽轮的排料和排药变异系数

Fig. 8 Discharge variation coefficient of flute-wheel at different rotational speeds

斜槽轮的排药变异系数在 5% 以内, 在此转速范围工作时排药斜槽轮具有较高的排药精度和排药稳定性。

4.3 料药配比离散元仿真

在确定排料斜槽轮的转速范围后, 对喂粮器的料药配比混合过程进行离散元分析。根据排料斜槽轮转速取值范围为 40 ~ 60 r/min, 为使料药质量配比能在 (100 ~ 250): 1 范围内, 通过式 (1)、(4) 计算得排药斜槽轮转速取值范围应在 10 ~ 20 r/min。在此条件下, 对料药配比混合过程进行离散元仿真, 如图 9 所示。在料药配比控制器内对两个斜槽轮的转速进行设定, 两个斜槽轮开始转动时, 饲料和药物颗粒分别从输料管和输药管流下, 并在落药口下方的输料管处开始接触, 在图 9 中用绿色圆圈标注。

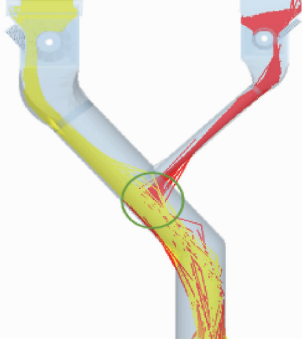


图 9 颗粒流运动示意图

Fig. 9 Schematic of grain flow movement

两种颗粒在接触时速度水平方向相反,药物颗粒因质量小、惯性小的原因会被质量大、惯性大的饲料颗粒带动,随饲料流一起沿输料管流动,最终一同下落到集料仓,仿真完成后两种颗粒在饲料槽内的分布情况如图 10 所示。



图 10 料药配比结果示意图

Fig. 10 Schematic of feed and drug mixing results

4.4 颗粒破碎情况分析

颗粒和颗粒之间、颗粒与料仓壁之间、颗粒和斜槽轮之间存在着力的作用,主要以挤压力的形式存在;饲料颗粒在经饲料分流刀分流时,二者之间存在着碰撞力的作用。图 11 为两个斜槽轮工作时饲料颗粒和药物颗粒的力链分布图。由图 11 可知,在斜槽轮与毛刷的接触区颗粒受到的力最大,其余部位的挤压力随着力链向周围颗粒的辐射而衰减。通过 EDEM 2018 进行离散元分析得到排料斜槽轮转速为 60 r/min、排药斜槽轮转速为 20 r/min 时,饲料颗粒和药物颗粒受力范围分别为 0 ~ 37.4 N 和 0 ~ 8.9 N。图 12 为排料斜槽轮转速为 60 r/min 时,饲料颗粒与饲料分流刀碰撞时饲料颗粒的受力分析图,由图 12 可知,在饲料分流过程中,饲料颗粒所受的力均在 10 N 以下。

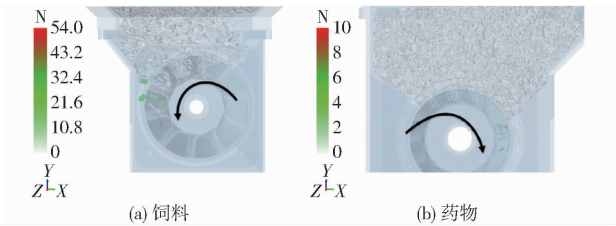


图 11 槽轮转动时颗粒力链分布图

Fig. 11 Particle force chain distribution diagrams when flute-wheel rotated

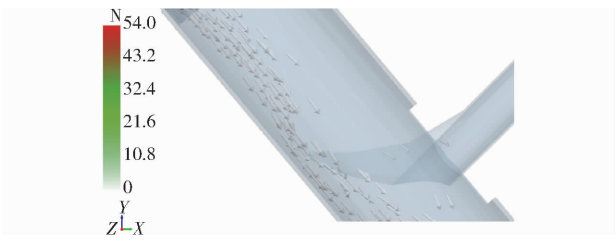


图 12 分流时饲料颗粒受力图

Fig. 12 Force diagram of feed particles during diversion

根据测定的饲料颗粒的破碎力为 54 N,药物颗粒的破碎力为 10 N,结合仿真结果分析得饲料和药物颗粒在整个运动过程中所受的最大外力均小于颗粒本身的破碎力,因此不会发生颗粒破碎现象。

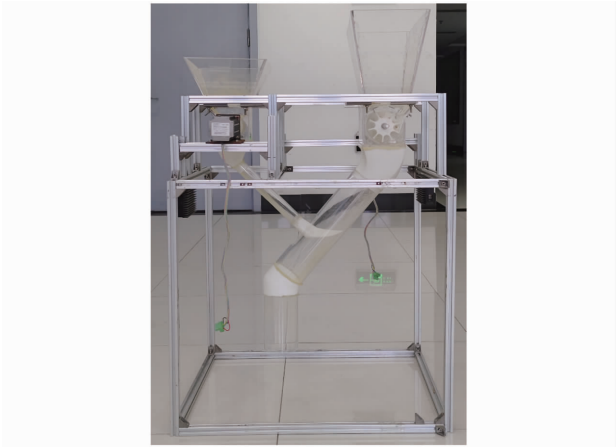


图 13 台架试验样机

Fig. 13 Bench test prototype

5 台架试验

为验证此饲喂器的排料稳定性和料药配比混合的均匀性,以育肥猪饲料(福建傲农生物科技集团股份有限公司)、甘草颗粒(合肥中龙神力动物药业有限公司)为试验材料进行台架试验,台架试验样机如图 13 所示。在出料口下方 200 mm 处放置集料仓,对排料斜槽轮在 40 ~ 60 r/min(转速增量为 10 r/min),排药斜槽轮在 10 ~ 20 r/min(转速增量为 5 r/min)的转速范围内进行排料试验,斜槽轮旋转 5 圈后用电子天平称量其排出饲料的质量,每个转速重复 5 次,测量完毕后对其排料斜槽轮和排药斜槽轮的单转排料量进行计算,结果如下:当转速为 40、50、60 r/min 时,排料斜槽轮单转排料量分别为 407.867 4、397.894 3、389.507 3 g;当转速为 10、15、20 r/min 时,排药斜槽轮单转排药量分别为 9.278 6、8.907 5、8.729 4 g。

由上述数据可知,在排料斜槽轮和排药斜槽轮的不同转速组合下可以实现不同的料药质量配比,计算得可实现的料药质量配比范围为 (93.4 ~ 251.8) : 1,给定的 (100 ~ 250) : 1 的料药质量配比在此区间范围内。在此基础上继续试验,测得排出的饲料和药物质量比分别为 100 : 1、150 : 1、200 : 1、250 : 1 时,对应排料斜槽轮与排药斜槽轮转速如表 2 所示。

表 2 料药质量配比与转速对应关系
Tab. 2 Relationship between mixing mass ratio and rotational speed

料药质量配比	排料斜槽轮转速/	排药斜槽轮转速/
	(r·min ⁻¹)	(r·min ⁻¹)
100:1	40	18
150:1	50	15
200:1	60	13
250:1	60	10

通过料药配比控制器对两个斜槽轮的转速和工作时间进行设定,控制器根据设定值发送不同频率的 PWM 脉冲驱动 2 个步进电机以相应转速转动,以料药质量配比 100:1 为例,在控制器内设定排料斜槽轮转速为 40 r/min,排药斜槽轮转速为 18 r/min,设定两个斜槽轮的工作时间均为 5 s。令样机在 100:1、150:1、200:1、250:1 这 4 个不同的料药质量配比下各工作 5 s。对两种颗粒的变异系数分别进行计算,计算结果如表 3 所示。混合后的两种颗粒如图 14 所示。

表 3 不同料药质量配比下饲料和药物的变异系数

Tab.3 Variation coefficient of feed and drug under different feed and drug quality ratios %

料药质量配比	变异系数	
	饲料	药物
100:1	6.372	5.514
150:1	4.769	6.127
200:1	5.281	6.598
250:1	5.064	7.136



图 14 混合后的颗粒
Fig.14 Mixed particles

从表 3 可以看出饲料颗粒的排料变异系数变化趋势与仿真的变化趋势一致,且在数值上差异不大;药物颗粒的排药变异系数随着转速的降低而增大但增幅较小,并且因药物质量在颗粒总质量中所占比例非常小,因此对料药配比整体均匀度的影响不显著。综上所述,试验结果表明设计的精准配比料药一体化饲喂器能实现饲料和药物的精准配比。由图 14 可见,饲料和药物颗粒混合均匀,且饲料颗粒和药物颗粒均没有破碎。本文设计的精准配比料药一体化饲喂器与料线的下料设备相连接,配比后的饲料直接落到料槽内,避免了输送距离过长导致料药配比不均匀的问题。

6 结论

- (1)设计了一种精准配比料药一体化饲喂器,解决了大粒径大流量的饲料颗粒与小粒径小流量的药物颗粒配比不均匀问题,实现实时精准加药。
- (2)对饲料和药物颗粒的物料特性进行测定,通过离散元仿真实验发现本文设计的排料斜槽轮在转速 40 ~ 60 r/min 时具有较高的排料精度和排料稳定性,与之配合的排药斜槽轮在转速 10 ~ 20 r/min 时,能实现在 (100 ~ 250):1 的料药质量配比内进行配比。
- (3)通过台架试验测得排料斜槽轮和排药斜槽轮在每个转速增量下的单转排量,并找到了在给定料药质量配比下的两个斜槽轮对应的转速。通过台架试验对料药配比变异系数进行计算,试验结果表明设计的精准配比料药一体化饲喂器能实现饲料和药物颗粒的实时精准配比。

参 考 文 献

[1] 李常营,郑玉倩,曾兵,等.生猪智能化精准饲喂系统发展现状及展望[J].猪业科学,2021,38(9):48-51.
LI Changying,ZHENG Yuqian,ZENG Bing,et al. The recent advance and prospect of intelligent precision feeding system for swine[J]. Swine Industry Science, 2021,38(9):48-51. (in Chinese)

[2] 陈倩. 生猪养殖中传染病的预防与治疗策略探析[J]. 吉林畜牧兽医,2023,44(1):42-43.
CHEN Qian. Analysis of prevention and treatment strategies for infectious diseases in pig breeding[J]. Jilin Animal Husbandry and Veterinary Medicine,2023,44(1):42-43. (in Chinese)

[3] POMAR J, LOPEZ V, POMAR C. Agent-based simulation framework for virtual prototyping of advanced livestock precision feeding systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2011,78(1):88-97.

[4] AgriEXPO. DEC HDR[EB/OL]. [2022-03-10]. <https://www.agriexpo.cn/prod/rovibec-agrisolutions/product-172425-9271.html>.

[5] BERG L. Master Trading—Tube-O-Mat Classic[J]. National Hog Farmer,2012,8(1):27-28.

[6] 杨亮,熊本海,王辉,等. 家畜饲喂机器人研究进展与发展展望[J]. 智慧农业(中英文),2022,4(2):86-98.
YANG Liang,XIONG Benhai,WANG Hui,et al. Research progress and outlook of livestock feeding robot[J]. Smart Agriculture, 2022,4(2):86-98. (in Chinese)

[7] 熊本海,杨亮,郑姗姗,等. 哺乳母猪精准饲喂下料控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(20):177-182.
XIONG Benhai,YANG Liang,ZHENG Shanshan,et al. Design and experiment of precise feeding and feeding control system for lactating sows[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(20):177-182. (in Chinese)

[8] 闫银发,孟德兴,宋占华,等. 槽轮式补饲机颗粒动力学数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):249-253.

YAN Yinfu,MENG Dexing,SONG Zhanhua,et al. Particle kinetic simulation and experiment for flute-wheel feeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):249-253. (in Chinese)

[9] 单虎,单一恒,秦志华,等. 一种带加药器的猪用饮水装置:CN108522328B[P]. 2019-08-13.

[10] 黄淑兴. 一种料线加药装置:CN219031080U[P]. 2023-05-16.

[11] 闫银发,赵庆吉,王瑞雪,等. 四槽轮配肥器肥料颗粒碰撞掺混离散元分析与优化设计[J]. 农业机械学报,2023,54(3):49-59.

YAN Yinfu,ZHAO Qingji,WANG Ruixue,et al. Discrete element analysis and optimization design of collision blending for four flute-wheels fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(3):49-59. (in Chinese)

[12] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国科学技术出版社,2007.

[13] 杨凯,高广雄,郭猛,等. 不同初生重、日采食量和日采食次数对猪生长性能的影响[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版),2022,40(2):56-62.

YANG Kai,GAO Guangxiong,GUO Meng,et al. Effects of different birth weight,average daily feed intake and number of visits per day on growth performance of pigs[J]. Journal of Foshan University(Natural Science Edition),2022,40(2):56-62. (in Chinese)

[14] 宋占华,贺刚,闫银发,等. 智能化奶牛个体精料变量补饲机槽轮充满系数的试验研究[C]//亚洲农业工程学会,中国农业机械学会,全国农业机械标准化技术委员会,中国农业工程学会.2010 国际农业工程大会现代畜牧业装备创新与产业化分会论文集,2010:124-128.

[15] 朱卿创. 螺旋槽轮式排肥器的研究[D]. 广州:华南农业大学,2017.

[16] 马旭,邝健霞,齐龙,等. 水稻田间育秧精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(7):31-37.

MA Xu,KUANG Jianxia,QI Long,et al. Design and experiment of precision seeder for rice paddy field seeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):31-37. (in Chinese)

[17] 田立权,王金武,唐汉,等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2016,47(5):46-52.

TIAN Liqun,WANG Jinwu,TANG Han,et al. Design and performance experiment of helix grooved rice seeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):46-52. (in Chinese)

[18] 刘春波,臧英,罗锡文,等. 水稻直播机螺旋槽轮排种器设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报,2016,47(6):734-739.

LIU Chunbo,ZANG Ying,LUO Xiwen,et al. Design and experiment of spiral grooved wheel for rice direct seeding machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016,47(6):734-739. (in Chinese)

[19] 张金波. 深松铲减阻耐磨仿生理论与技术[D]. 长春:吉林大学,2014.

[20] VAN LIEDEKERKE P,TIJSKENS E, RAMON H. Discrete element simulations of the influence of fertilizer physical properties on the spread pattern from spinning disc spreaders[J]. Biosystems Engineering,2009,102(4):392-405.

[21] KEPPLER I,KOCSIS L,OLDAL I, et al. Grain velocity distribution in a mixed flow dryer[J]. Advanced Powder Technology, 2012,23(6):824-832

[22] WEIGLER F,MELLMANN J. Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer[J]. Particuology,2014,12(1):33-39.

[23] 张季琴,刘刚,胡号,等. 双变量螺旋外槽轮排肥器控制序列对排肥性能的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):137-144.

ZHANG Jiqin,LIU Gang,HU Hao,et al. Influence of control sequence of spiral fluted roller fertilizer distributor on fertilization performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.1):137-144. (in Chinese)