

牛舍智能推料作业机器人设计与试验

岳健民¹ 董创^{1,2} 王海峰¹ 贾楠¹ 朱君¹ 李斌¹

(1.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097; 2.天津农学院工程技术学院,天津 300384)

摘要:针对传统人工推料劳动强度大、作业效率低,难以满足牛只采食需求,饲喂精料易下沉导致营养不均等问题,本文设计一款基于双螺旋结构的牛舍智能推料作业机器人。根据牛舍推料饲喂流程和输送原理,对推料机器人整机结构和控制系统进行了研究;分析了饲料推送运动过程,确定双螺旋推送机构工作结构和主要参数,利用 EDEM 离散元仿真软件建立推料作业过程颗粒群运动仿真模型;以饲料含水率、双螺旋推送机构转速以及机器人前进速度为试验因素,推送率为评价指标,进行三因素三水平正交试验。仿真结果表明,最优推料参数组合为饲料含水率 50%、双螺旋推送机构转速 72 r/min、机器人前进速度 0.3 m/s。室内试验结果与仿真试验结果推送率平均相对误差 6.11%,表明构建的仿真模型具有较高的可行性。牛舍现场试验结果表明,推料机器人最大饲料推送率为 98.15%,避障成功率 100%,可在空载条件下连续工作 25.5 h,实际推料条件下连续工作 3~5 h,满足牛舍推料需求。研究结果为畜牧养殖智能化推料作业装备研发提供技术参考。

关键词:推料机器人;牛舍;双螺旋推送机构

中图分类号: TP242.6; S817.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)02-0101-08

OSID:



Design and Experiment of Intelligent Feed-pushing Robot for Cowshed

YUE Jianmin¹ DONG Chuang^{1,2} WANG Haifeng¹ JIA Nan¹ ZHU Jun¹ LI Bin¹

(1. Intelligent Equipment Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

2. College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In response to the prominent issues of high labor intensity and low operational efficiency in traditional manual feed-pushing, which struggle to meet the feeding demands of cattle, along with uneven nutrition distribution caused by the sinking of concentrated feed, an intelligent feed-pushing robot for cattle barns was developed based on a dual-screw structure. Firstly, the overall structure and control system of the feed-pushing robot were designed according to the feeding and transportation processes in cattle barns. Then the feed-pushing motion was analyzed to determine the working structure and key parameters of the dual-screw pusher. EDEM discrete element simulation software was used to establish a simulation model of particle group movement during the feed-pushing process. Finally, a three-factor, three-level orthogonal experiment was conducted to identify the optimal feed-pushing combination, with feed moisture content, dual-screw pusher speed, and robot forward speed as experimental factors, and pushing rate as the evaluation index. The simulation results were validated through actual robot testing. The simulation experiment results showed that the optimal feed-pushing parameter combination was 50% feed moisture content, 72 r/min dual-screw pusher speed, and 0.3 m/s robot forward speed. The indoor experimental results indicated an average relative error of 6.11% between the simulated and actual pushing rates, confirming that the developed simulation model had high feasibility. Field tests conducted in cattle barns demonstrated that the robot achieved a max feed-pushing rate of 98.15%, the obstacle avoidance success rate was 100%, and it can work continuously for 25.5 h under no-load conditions, and can work continuously for 3~5 h under actual feed-pushing conditions, meeting the operational requirements of cattle barn feeding. The research result can provide a technical reference for the development of intelligent feed-pushing equipment in livestock farming.

Key words: feed-pushing robot; cowshed; double helix conveyor

收稿日期: 2024-10-17 修回日期: 2024-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1301103)

作者简介: 岳健民(1999—),男,工程师,主要从事畜禽养殖智能装备研究,E-mail: yuejm@nercita.org.cn

通信作者: 李斌(1983—),男,研究员,主要从事畜禽养殖智能装备研究,E-mail: lib@nercita.org.cn

0 引言

据统计,截止 2023 年底,全国牛只存栏量达 1.05×10^9 头,位居世界第三。近年来,我国养殖业规模化、标准化和集约化的发展步伐加快,养牛模式正逐步由依赖大量劳动力的数量增长型向以创新驱动的质量和效率增长转型,对养殖效率和产品质量的要求也越来越高^[1-2]。传统养殖饲喂环节中,主要采用人工推料方式,存在效率低、劳动强度大、饲料分布不均等问题^[3-4]。因此,亟需研发适用于牛舍环境的推料机器人。

推送机构是推料机器人的关键部件,对提高饲料推送效率及利用率具有显著作用^[5]。目前推料机器人推送机构一般采用刮板式和自旋转式等推送方式^[6]。王保兴等^[7]使用刮板方式进行饲料推送,并结合清扫装置,实现了奶牛舍推料和清扫作业。万畅等^[8]通过集成外啮合齿轮、推送支撑机构和旋转推送机构形成了一种自旋转式饲草推送装置,将饲草推至奶牛饲喂区内,实现推送功能。兰望娇等^[9]以自旋转式推料方式进行仿真,并在奶牛场验证推料效果,推送率为 94.6%。这些推料方式结构简单、便于操作,但因自身机械结构特点无法有效改变饲料层次结构,易出现精料下沉^[10]。双螺旋机构因其自身具有斜向推送工作的结构特点^[11],可实现推料过程中的粗精饲料混合,有效避免精料下沉。目前国内外主要针对基于双螺旋结构的物料推送过程进行研究。乌兰图雅等^[12]对揉碎玉米秸秆螺旋推送过程中的物料压缩、螺距和离心力进行理论分析与模型修正。VAN SNICK 等^[13]通过对螺旋输送机中的表征材料进行试验,对材料特性和过程变量与停留时间分布响应关系进行构建,得到影响权重比。HAN 等^[14]基于离散元法对立式螺旋碾米机颗粒输送转速、高度和进料口类型进行了数值研究。ZHAO 等^[15]采用离散元方法对粉体输运进行仿真,通过对螺旋输送机内径、螺距和速度进行仿真,得到最优解。上述研究主要是对固定式双螺旋推送机构研究,但只分析了物料传输过程的影响因素;基于双螺旋结构推料机器人饲料推送过程研究较少,对双螺旋推送器结构参数不明确,且缺乏机器人整机推料效果验证。

本文设计推料机器人整机结构,并对推料效果进行研究,分析推料作业过程颗粒群运动状态,确定双螺旋推送器关键参数,利用正交试验对推料效果进行仿真试验和室内试验,最后,通过牛舍试验验证推料机器人推料效果,并测定推送率。

1 牛舍智能推料作业机器人整体设计

1.1 总体结构

推料机器人由底盘、推料升降机构、螺旋推料机构、控制箱、电池和壳体等组成,如图 1 所示。推料机器人采用三轮底盘,前方 2 个为驱动轮,由伺服电机驱动,后方 1 个为万向轮,通过驱动轮差速实现转向;底盘前端固定升降机构,可带动推料机构升降,当进行推料工作时,升降机构带动推料机构下降,到达规定离地间隙,完成推料工作需要转舍时则带动推料机构上升;推料机器人前方安装有螺旋推料机构,螺旋推料机构包括推料机构外罩、双螺旋推送机构和电机等,在推料机器人前进过程中,旋转的双螺旋推送机构将饲料送回进食区,双螺旋推送机构动力由带有减速器的伺服电机提供。

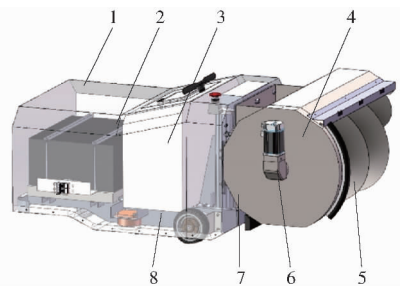


图 1 推料机器人结构示意图

Fig. 1 Schematic of structure of material feed-pushing robot
1. 壳体 2. 电池 3. 控制箱 4. 推料机构外罩 5. 双螺旋推送机构 6. 电机 7. 推料升降机构 8. 底盘

1.2 控制系统

机器人控制系统示意图 2 所示,包括控制单元、采集单元、显示单元、执行单元和电池单元。控制单元型号为 STM32F407ZET6;采集单元包括光电传感器、压敏传感器、磁导航传感器、站点传感器和信号接收器;显示单元为显示屏;执行单元包括驱动轮电机、滑台电机、推料电机、信号发射器和接触器;电池单元选用密度低、安全性高的磷酸铁锂电池,输出电压为 48 V,电池容量为 60 A·h。

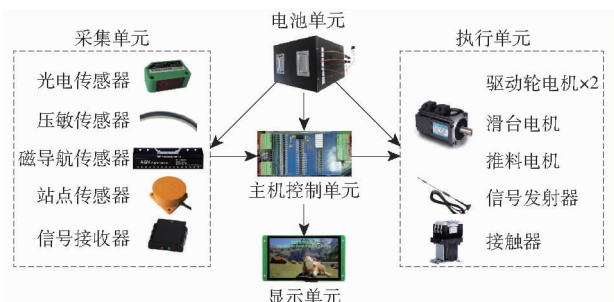


图 2 推料机器人控制部分示意图

Fig. 2 Schematic of control part of material feed-pushing robot

控制系统工作原理如图 3 所示。在导航移动方面,磁导航传感器和站点传感器将导航信息传递给主控单元,主控单元处理数据并将控制信息传递给相应执行单元控制机器人行走路径和工作状态,光电传感器通过调整预设距离进行障碍检测,若物体处于光电盲区时,压敏传感器可通过物理触碰进行障碍检测,共同控制机器人启停避障,保障人机安

全。在充电控制方面,电池单元将电压、电流和温度等数据传递给主控单元,当电量不足以支撑机器人继续工作时,主控单元会控制机器人返回充电站,到达指定位置后,充电控制单元控制继电器给刷块通电,推杆电机推出刷块与机器人上的刷板接触,给电池单元充电。机器人可手动通过信号接收器接收人工手柄控制数据,也可根据设定自动工作。

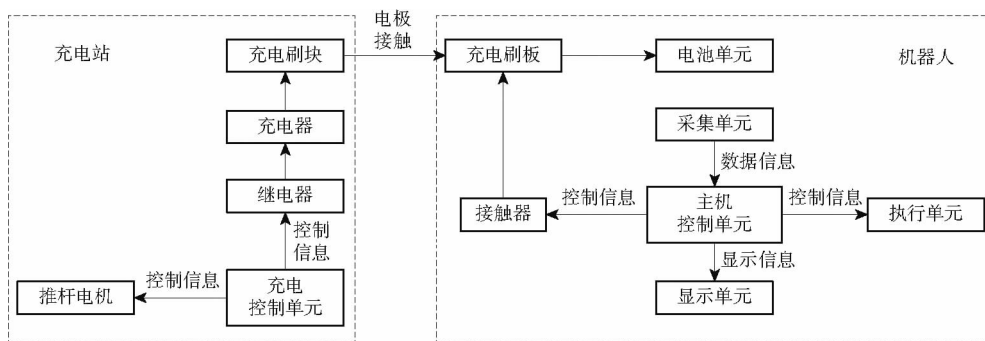


图 3 控制系统工作原理

Fig. 3 Working principle of control system

2 螺旋推料机构设计

双螺旋推送机构是牛舍智能推料作业机器人关键部件,如图 4 所示。螺旋叶片采用 Q235 冷轧钢拉制而成,按参数要求将其焊接在螺旋轴上,螺旋叶片动力由伺服电机提供。为了满足实际牛舍饲料推送率,对双螺旋推送器进行了运动学分析和关键参数确定。式中 L 为双螺旋推送机构长度, d 为轴内径, D 为轴外径, S 为螺距, N 为叶片头数量。

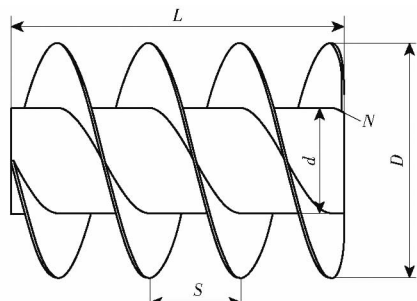


图 4 双螺旋推送机构结构示意图

Fig. 4 Schematic of spiral conveyor structure

2.1 螺旋推料机构运动学分析

饲料进入双螺旋推送机构后,在螺旋推料机构推动下运动,将任意半径 r 处饲料颗粒简化为质点 M ,并对其进行运动学分析^[16-17]。在推送力作用下饲料颗粒做轴向运动和圆周运动,速度分析如图 5 所示。设双螺旋推送机构角速度为 ω 。点 O 为饲料质点 M 所处位置,到中心线距离为 r ,饲料颗粒线速度(牵连速度) $v_0 = \omega r$,方向为回转切线方向;饲料颗粒相对滑动速度 v_n 方向平行于螺旋线切线;绝对运动速度 v_n 方向为点 O 处法线

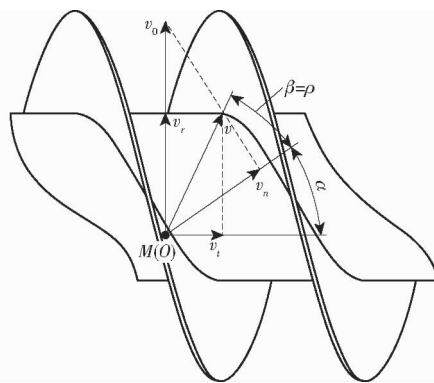


图 5 饲料颗粒速度分析

Fig. 5 Analysis of feed particle velocity

方向。

实际上双螺旋推送机构叶片和饲料之间存在摩擦,导致实际运动速度 v 会偏移角度 β ,对于一般冷轧钢板拉制的螺旋面可忽略其表面粗糙度对 β 的影响^[18],可认为 $\beta \approx \rho$ 。 v_n 为忽略摩擦时饲料颗粒运动速度, v 为饲料颗粒实际运动速度。将实际运动速度 v 分解得到轴向速度 v_t 和圆周速度 v_r 。可得轴向速度和周向速度为

$$\begin{cases} v_t = v \cos(\alpha + \beta) \\ v_r = v \sin(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\alpha = \arctan \frac{S}{2\pi r}$ $\beta \approx \rho = \arctan M$

式中 α ——螺旋上升角, ($^\circ$)

由图 5 可得

$$\begin{cases} v = \frac{v_n}{\cos\beta} \\ v_n = v_0 \sin\alpha \end{cases} \quad (2)$$

根据饲料颗粒运动学分析得到

$$v_0 = \omega r = \frac{2\pi N}{60} \frac{S}{2\pi \tan \alpha} = \frac{SN}{60 \tan \alpha} \quad (3)$$

结合式(1)~(3)可得饲料颗粒轴向速度和周向速度计算式为

$$v_t = \frac{SN}{60} \frac{1 - \mu \frac{S}{2\pi r}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{S}{2\pi r}\right)^2\right] (1 + \mu^2)}} \quad (4)$$

$$v_r = \frac{SN}{60} \frac{\frac{S}{2\pi r} + \mu}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{S}{2\pi r}\right)^2\right] (1 + \mu^2)}} \quad (5)$$

式中 μ ——饲料与螺旋面摩擦因数,取 0.33^[19]

综上可得,在设计双螺旋推送机构时应满足^[20]:设计推送量应大于实际饲料量。饲料在机器人前进方向运动量不能过大。双螺旋推送机构各位置圆周速度均应小于轴向速度 $v_r < v_t$ 。当式(4)、(5)中双螺旋推送器导程、转速和摩擦因数确定时,可得轴向速度和圆周速度随半径的变化曲线如图 6 所示。

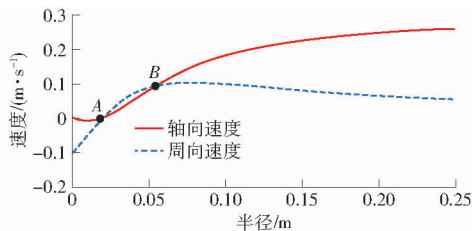


图 6 速度-半径关系曲线

Fig. 6 Speed radius relationship curves

由图 6 可知,点 A 左侧 $v_t < 0$,此半径以下的饲料并不能推向指定区域;点 A 与点 B 之间 $v_t < v_r$,饲料颗粒并不能沿轴向运动,所以这两区域半径并不可取;点 B 右侧周向速度有明显下降趋势,饲料在轴向运动的同时有一定的圆周方向运动,可满足推料过程适度翻料需求,所以此段为理想半径取值段。

2.2 双螺旋推送机构关键参数确定

2.2.1 公称直径

推送量取决于双螺旋推送机构截面积、推送速度、物料性质和装满程度等。装满程度与双螺旋推送机构所处位置有关,水平安装装满程度大于倾斜安装。双螺旋推送机构为水平安装,得出倾角 β 为 0° ,倾角系数 C 为 1,并根据牛舍实际情况^[21]推算出全混合日粮(Total mixed ration, TMR)饲料推送量 Q 为 20 t/h。查阅文献^[22]可知,容重 γ 为 0.3 t/m^3 ,充填系数 ψ 为 0.33,综合特性系数 K 为 0.0145。螺旋叶片公称直径计算式为

$$D > K \sqrt{\frac{5}{2}} \frac{Q}{\psi C \gamma} \quad (6)$$

计算可得 $D > 0.34 \text{ m}$,为了确保双螺旋推送器推送

能力,确定公称直径为 0.4 m。

2.2.2 导程

根据设计要求 $v_r < v_t$,可得导程

$$S < 2\pi R \tan\left(\frac{\pi}{4} - \rho\right) \quad (7)$$

式中 R ——双螺旋推送机构半径, m

可得 $S < 0.633 \text{ m}$,当双螺旋推送机构水平布置时, $S = (0.8 \sim 1)D$,故双螺旋推送机构导程取 0.32~0.40 m,本文取 0.35 m。

2.2.3 螺旋轴直径

根据双螺旋推送机构设计要求,当饲料颗粒到双螺旋推送机构中心轴距离等于螺旋轴半径时(即 $r = d/2$ 时),同样应满足 $v_r < v_t$,从而使轴径处饲料颗粒可被轴向推送,得到螺旋轴直径

$$d \geq \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \frac{S}{\pi} \quad (8)$$

得知 $d > 0.11 \text{ m}$,再根据螺旋轴直径要求^[23]: $d = (0.2 \sim 0.55)D = 0.08 \sim 0.22 \text{ m}$,可知螺旋轴直径为 0.11~0.22 m,本文取 0.2 m。

3 推料效果仿真

3.1 仿真预处理

螺旋推料机构由双螺旋推送机构、推送机构外罩等组成,使用 Solidworks 软件对螺旋推料机构进行三维建模,并对模型进行相应简化,将模型保存为 stp 格式并导入 EDEM 中^[24],导入模型如图 7 所示。

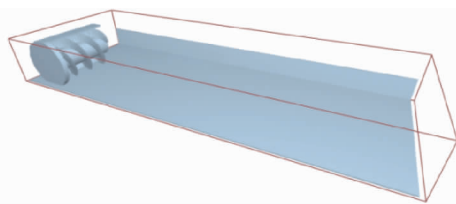


图 7 EDEM 仿真模型

Fig. 7 EDEM simulation model

仿真过程中,重力加速度为 9.81 m/s^2 ,EDEM 中材料物性参数可分为 3 类:材料本征参数、材料基本接触参数和接触模型参数。通过测定 TMR 饲料容重得饲料颗粒密度为 300 kg/m^3 ,TMR 饲料、双螺旋推送机构和推料机构外罩材料本征参数如表 1 所示^[25-26];物料基本接触参数如表 2 所示;由于 TMR 饲料含水率较大,饲料颗粒间出现了明显粘附和团聚现象,选用 Hertz-Mindlin with JKR 作为饲料颗粒之间接触模型;饲料颗粒与推料机构间粘附现象不明显,选用 Hertz-Mindlin 作为饲料颗粒与推料机构之间接触模型^[27]。

表1 材料本征参数

Tab.1 Intrinsic parameters of materials

参数	TMR 饲料	双螺旋推送器	推料机构外罩
密度/(kg·m ⁻³)	300	7 850	7 850
泊松比	0.25	0.30	0.30
剪切模量/Pa	1.0 × 10 ⁵	7.7 × 10 ¹⁰	7.7 × 10 ¹⁰

表2 物料基本接触参数

Tab.2 Basic contact parameters of materials

参数	饲料-饲料	饲料-双螺旋推送器	饲料-推料机构外罩
碰撞恢复系数	0.1	0.3	0.3
静摩擦因数	0.60	0.33	0.33
滚动摩擦因数	0.01	0.01	0.01

依据牛舍和 TMR 饲料实际情况,将仿真系统中饲料带体积(长×宽×高)设为 0.5 m×0.4 m×0.2 m,根据容重可计算出仿真饲料质量为 12 kg,可用 3 种直径为 3、6、15 mm 颗粒模拟 TMR 饲料,其中 3 mm 颗粒占 35% (4.2 kg),6 mm 颗粒占 15% (1.8 kg),15 mm 颗粒占 50% (6 kg)。在双螺旋推料机构正前方 1 m 位置设置 1 个虚拟属性颗粒工厂,颗粒按质量生成,下落速度为 0 m/s,生成位置随机。

仿真过程中设置时间步长为瑞丽时间步长的 19.669%^[28],从颗粒生成到仿真完成总时间为 20 s,保存时间间隔为 0.05 s,网格尺寸为最小颗粒的 9 倍(54 mm),仿真过程使用 GPU 加速,处理器: Intel® Core i9 - 10900 CPU @ 3.70 GHz × 20, GPU: TITAN RTX/PCIe/SSE2。

3.2 仿真试验

由于牛舍实际饲料含水率为 40% ~ 60%,且在真实环境下水分存在蒸发现象,故选择 3 个含水率饲料:30%、40% 和 50%;根据实际生产要求,选择双螺旋推送机构 3 个水平转速 60、72、84 r/min 和推料机器人 3 个水平前进速度 0.1、0.2、0.3 m/s。进行三因素三水平正交试验^[29-30],每次仿真在饲料带前后设置 1 m 推料缓冲区。因素水平见表 3。

表3 试验因素水平

Tab.3 Factors and levels

水平	因素		
	饲料含水率/%	转速/(r·min ⁻¹)	前进速度/(m·s ⁻¹)
1	30	60	0.1
2	40	72	0.2
3	50	84	0.3

3.3 评价指标

推送率指推料后饲料质量与推料前饲料质量之比,计算式为

$$T = \frac{Q_j}{Q_q} \times 100\% \quad (9)$$

式中 T ——推送率, %

Q_j ——推送到进食区饲料质量, kg

Q_q ——推送前饲料质量, kg

3.4 仿真结果与分析

利用 EDEM 后处理模块对仿真试验进行分析,可得每次试验后进食区饲料质量和饲料颗粒运动轨迹,图 8 为推料过程颗粒群运动。

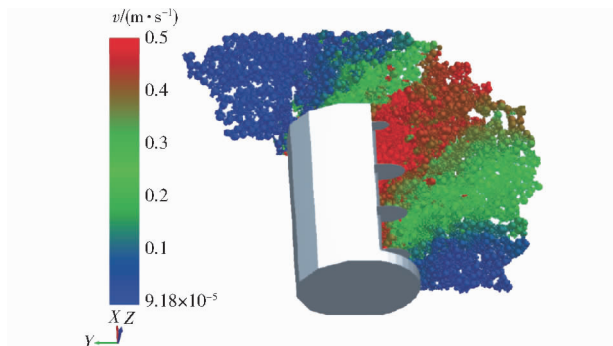


图8 推料过程颗粒群运动仿真

Fig.8 Simulation of granular motion in pushing process

正交试验方案与结果及极差分析结果如表 4 所示,表中 X、Y、Z 为因素水平。由表 4 可知,饲料含水率对推料效果影响最为明显 ($F = 72.60, P = 0.01 < 0.05$),随着饲料含水率增加饲料推送率也会上升,推料效果变好;其次,机器人前进速度 ($F = 9.85, P = 0.09 > 0.05$),随着机器人前进速度提升饲料推送率也会上升,推料效果变好;双螺旋推送机构转速影响最小 ($F = 0.19, P = 0.84 > 0.05$),随着机器人前进速度提升饲料推送率也会上升,推料效果

表4 仿真试验设计与结果

Tab.4 Simulation experiment arrangement and results

试验号	因素			推送率/%
	X	Y	Z	
1	1	1	1	97.00
2	1	2	2	97.15
3	1	3	3	97.81
4	2	1	2	98.67
5	2	2	3	99.02
6	2	3	1	98.40
7	3	1	3	99.04
8	3	2	1	98.68
9	3	3	2	98.76
1	291.96	294.71	294.08	
2	296.09	294.84	294.57	
3	296.48	294.97	295.87	
F	72.60	0.19	9.85	
P	0.01	0.84	0.09	
因素影响程度				$X > Z > Y$
因素最佳组合				$X_3 Z_3 Y_3$

变好。推料效果最佳组合为 $X_3Z_3Y_3$, 双螺旋推送机构转速为 84 r/min、前进速度为 0.3 m/s、饲料含水率为 50%。

4 试验验证

为验证仿真试验准确性和整机性能,设计了与仿真试验相仿的室内模拟试验和实际牛舍推料试验。

4.1 试验仪器与材料

仪器:电子天平(梅特勒托利多, XPR32000L/AC 型,量程 32.1 kg,精度 1 g)、湿度测试仪(杰科斯, JK-100 型,测量范围 0~100%,分辨率 0.1%)、米尺(5 m)。

试验材料:北京大地群生养殖专业合作社生产的 TMR 饲料(TMR 制备机品牌:萃欧立, 700ZK 型)。

4.2 试验方法与方案

室内试验装置与环境如图 9 所示,在室内布置推料机器人,铺设磁条,并在图示区域铺设 0.5 m × 0.4 m × 0.2 m TMR 饲料带,饲料组成和仿真模拟颗粒一致,并在饲料带前后设置 1 m 推料缓冲区。

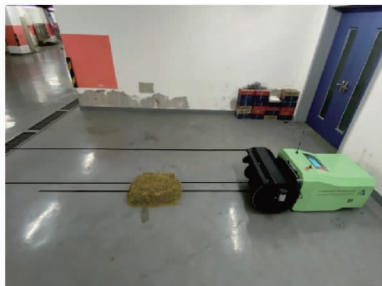


图 9 室内试验环境

Fig. 9 Laboratory testing environment

试验因素与 EDEM 仿真试验一致,选用 3 个饲料含水率:30%、40% 和 50%, 3 个双螺旋推送机构转速 60、72、84 r/min 和 3 个前进速度 0.1、0.2、0.3 m/s 进行正交试验。每次推料前对 TMR 饲料质量进行记录,推完料后收集进食区 TMR 饲料进行测量,推料过程中 TMR 饲料水分损失忽略不计,每次试验重复 5 次,用式(9)计算推送率,并取平均值。试验设计与结果如表 5 所示。

为验证推料机器人在实际牛舍真实性能,在北京市延庆区北京大地群生养殖专业合作社进行牛舍试验,如图 10 所示。选取推送率和避障情况作为推料机器人评价指标。

推送率试验在一栋长 80 m 的奶牛舍中选取其中 10 m 作为试验区域,在试验区域前后各设置 5 m 推料缓冲区,根据仿真试验和室内试验结果确定推料机器人工作参数:前进速度 0.3 m/s、双螺旋推送

表 5 饲料含水率、前进速度和双螺旋推送器转速对推送率影响

Tab.5 Influence of feed moisture content, forward speed, and double screw conveyor speed on pushing rate

试验号	因素			推送率/%
	X	Y	Z	
1	1	1	1	88.34
2	1	2	2	87.62
3	1	3	3	88.27
4	2	1	2	94.20
5	2	2	3	95.15
6	2	3	1	91.38
7	3	1	3	98.15
8	3	2	1	94.63
9	3	3	2	97.06
1	257.22	273.69	267.34	
2	280.73	277.39	278.87	
3	289.83	276.71	281.57	
F	43.09	1.15	3.41	
P	0.02	0.46	0.22	
因素影响程度				$X > Z > Y$
因素最佳组合				$X_3Z_3Y_2$



图 10 实际牛舍试验环境

Fig. 10 Actual cowshed testing environment

机构转速 72 r/min。由于牛舍路面不平整,推料过后在饲料带路面上还有未推到进食区的 TMR 饲料,在牛舍选择一个长 20 m 的饲料带,在推料前对 TMR 饲料进行称量,并对推送到进食区的 TMR 饲料进行称量。利用式(9)计算推送率,试验进行 3 次。

对推料机器人避障功能进行试验,确保其工作时符合安全要求。试验时,在推料机器人工作路径上随机放置 5 处障碍物,每次避障停机报警后,测量机器人到障碍物距离并记录,随后移除障碍物使其继续行进,直至 5 处避障距离数据采集完毕,试验重复 3 次。

4.3 结果与分析

由表 5 可知,随着饲料含水率增加饲料推送率也会上升,推料效果变好;双螺旋推送机构在不同转速下推送率不同,转速为 72 r/min 时推送率最大,84 r/min 时推送率居中,60 r/min 时推送率最小;随

着机器人前进速度提升,饲料推送率也会上升,推料效果变好。

对试验结果进行极差分析,得出饲料含水率对推料效果的影响最为显著, $F = 43.09$, $P = 0.02 < 0.05$,其次为前进速度, $F = 3.41$, $P = 0.22 > 0.05$,双螺旋推送机构转速影响最小, $F = 1.15$, $P = 0.46 > 0.05$ 。推料效果最佳组合为 $X_3Z_3Y_2$,双螺旋推送机构饲料含水率为50%、转速为72 r/min、前进速度为0.3 m/s。

如表6所示,根据仿真试验推送率与验证试验推送率进行相对误差分析,得知平均相对误差为6.11%。在仿真和验证试验结果中,饲料含水率50%和机器人前进速度0.3 m/s的组合均最优,说明构建的仿真模型具有较高的可行性。

表6 推送率标准值与仿真值对比

Tab.6 Comparison between standard and simulated values of push rate %

试验序号	标准值	仿真值	相对误差
1	88.34	97.00	9.81
2	87.62	97.15	10.88
3	88.27	97.81	10.81
4	94.20	98.67	4.75
5	95.15	99.02	4.06
6	91.38	98.40	7.68
7	98.15	99.04	0.91
8	94.63	98.68	4.29
9	97.06	98.76	1.75

牛舍试验结果表明,最大推送率98.15%,最小推送率87.62%,平均推送率92.76%。避障情况如表7所示,经过试验,推料机器人避障距离最大为

2 cm,安全避障成功率100%,障碍移除后正常恢复工作100%,可保证底盘运行安全性。推料机器人可在空载条件下连续工作25.5 h,实际推料条件下连续工作3~5 h。综上,推料机器人满足牛舍推料需求。

表7 避障试验结果

Tab.7 Statistics of obstacle avoidance test

试验序号	避障部件	避障距离/cm	避障成功率/%
1	左侧光电	0	100
2	中间光电	0	100
3	右侧光电	1	100
4	绞笼压敏	2	100
5	车尾压敏	0	100

5 结论

(1)设计了一款适用于我国牛舍环境的智能推料机器人,通过运动学分析设计并确定了推料核心部件双螺旋推送机构公称直径、导程和螺旋轴直径等关键参数。

(2)三因素三水平正交试验结果表明,对推料效果影响由大到小为:饲料含水率、前进速度、双螺旋推送器转速,最佳参数为:饲料含水率50%、机器人前进速度0.3 m/s、双螺旋推送机构转速72 r/min。

(3)在室内环境和真实牛舍环境进行试验验证,室内结果与仿真结果推送率平均相对误差为6.11%,组合结果均为最优,与仿真结果基本一致,表明构建的仿真模型具有较高的可行性,在实际牛舍试验最大推送率为98.15%,避障成功率100%,可在空载条件下连续工作25.5 h,实际推料条件下连续工作3~5 h,满足牛舍推料需求。

参 考 文 献

- [1] 石芳权,王辉,赵一广,等.数字化技术与装备在奶牛养殖中的应用[J].中国乳业,2021(8):60-67.
- [2] 焦盼德,贺成柱,杨军平,等.奶牛智能推料机器人的研制[J].中国农机化学报,2018,39(1):74-77.
JIAO Pande, HE Chengzhu, YANG Junping, et al. Development and manufacture of intelligent push feed robot for cows[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(1): 74-77. (in Chinese)
- [3] 熊本海,蒋林树,杨亮,等.奶牛饲喂自动机电控制系统的设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(7):157-163.
XIONG Benhai, JIANG Linshu, YANG Liang, et al. Design and test of electromechanical control system of automatic feeder for dairy cow[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 157-163. (in Chinese)
- [4] 蒙贺伟,郭跃虎,高振江,等.双模自走式奶牛精确饲喂装备设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(2):52-56.
- [5] 宋怀波,段援朝,李嵘,等.基于激光SLAM的牛场智能推翻草机器人自主导航系统[J].农业机械学报,2023,54(2):293-301.
SONG Huaibo, DUAN Yuanchao, LI Rong, et al. Autonomous navigation system for pasture intelligent overthrowing grass robot based on laser SLAM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 293-301. (in Chinese)
- [6] 张勤,任海林,胡嘉辉.基于信息融合的智能推料机器人设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(6):78-84,93.
ZHANG Qin, REN Hailin, HU Jiahui. Design and experiment of intelligent feed-pushing robot based on information fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 78-84, 93. (in Chinese)
- [7] 王保兴,董和银,范国强,等.牛羊养殖电动推料机设计与试验[J].中国农机化学报,2022,43(6):76-82.
WANG Baoxing, DONG Heyin, FAN Guoqiang, et al. Design and test of electric sweeper for cattle and sheep breeding[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(6): 76-82. (in Chinese)
- [8] 万畅,谭彧,郑永军,等.饲草推送机器人磁条导航自动充电研究[J].农业机械学报,2018,49(增刊):1-7,41.
WAN Chang, TAN Yu, ZHENG Yongjun, et al. Automatic charging of forage pushing robot by magnetic stripe navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 1-7, 41. (in Chinese)

- [9] 兰望娇,张希升,任建华,等. 基于 EDEM 的皮带式推料机器人推料仿真与试验研究[J]. 华南农业大学学报,2024,45(5):685-693.
LAN Wangjiao, ZHANG Xisheng, REN Jianhua, et al. Pushing simulation and experimental research of belt pusher robot based on EDEM[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(5): 685-693. (in Chinese)
- [10] CHEN Z, WANG H, ZHOU M, et al. Design and experiment of an autonomous navigation system for a cattle barn feed - pushing robot based on UWB positioning[J]. Agriculture,2024,14(5): 694.
- [11] 戚江涛,蒙贺伟,坎杂,等. 基于 EDEM 的双螺旋奶牛饲喂装置给料性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(24): 65-71.
QI Jiangtao, MENG Hewei, KAN Za, et al. Analysis and test of feeding performance of dual - spiral cow feeding device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 65-71. (in Chinese)
- [12] 乌兰图雅,王春光,祁少华,等. 揉碎玉米秸秆螺旋输送理论模型分析与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(22): 18-26.
WULANTUYA, WANG Chunguang, QI Shaohua, et al. Performance experiment of screw conveyor for chopped corn stalks [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 18-26. (in Chinese)
- [13] VAN SNICK B, KUMAR A, VERSTRAETEN M, et al. Impact of material properties and process variables on the residence time distribution in twin screw feeding equipment[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2019, 556: 200-216.
- [14] HAN Yanlong, JIA Fuguo, ZENG Yong, et al. DEM study of particle conveying in a feed screw section of vertical rice mill [J]. Powder Technology, 2017, 311: 213-225.
- [15] ZHAO Renfeng, GUO Lei, GAO Weicheng, et al. Structure optimization design of screw conveyor based on EDEM [C] // Journal of Physics Conference Series. JPhCS, 2022.
- [16] 王相友,王中祖,曲军哲,等. 入料速度动态调节式马铃薯切条机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):332-342.
WANG Xiangyou, WANG Zhongyi, QU Junzhe, et al. Design and experiment of potato slicer with dynamic adjustment of feeding speed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(6):332-342. (in Chinese)
- [17] 顿国强,吴星澎,纪欣鑫,等. 斜口螺旋精控排肥器优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(7):167-174.
DUN Guoqiang, WU Xingpeng, JI Xinxin, et al. Optimization design and experiment of oblique opening spiral precision control fertilizer apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):167-174. (in Chinese)
- [18] 谢佳珺. 单轴双螺旋带式饲料混合机的优化设计与试验[J]. 南方农机,2023,54(20):33-37.
- [19] 韩棒斌,任重义,张东峰,等. TMR 饲料制备机搅龙的受力分析以及优化[J]. 宁夏工程技术,2022,21(1):75-79.
HAN Bangbin, REN Zhongyi, ZHANG Dongfeng, et al. Force analysis and optimization of TMR mixer auger[J]. Ningxia Engineering Technology, 2022,21(1):75-79. (in Chinese)
- [20] OLANREWAJU T O, JEREMIAH I M, ONYEANULA P E. Design and fabrication of a screw conveyor[J]. Agricultural Engineering International: The CIGR e - journal, 2017, 19(3): 156-162.
- [21] 魏晓莉,刘慧鑫,刘慧环,等. 基于采食行为参数的奶牛个体采食量量化方法研究[J]. 东北农业大学学报,2023,54(6): 42-52.
WEI Xiaoli, LIU Huixin, LIU Huihuan, et al. Quantification method of dairy cow individual feed intake based on dairy cow feeding behavior parameters [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023,54(6):42-52. (in Chinese)
- [22] 吴雨珊,杨洁,李军国,等. 蛋白原料及其混合粉料理化性质对颗粒饲料加工质量的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(7): 301-308.
WU Yushan, YANG Jie, LI Junguo, et al. Effects of physicochemical properties of protein raw materials and their mash feed on the processing quality of pellet feed[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 301-308. (in Chinese)
- [23] GONG Zeqi, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Simulation analysis and design of vertical screw silage-conveyor based on EDEM [C] // 2016 · ASABE Annual International Meeting American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016.
- [24] 戴恩亮. 基于离散元法的双螺旋输送机性能研究及优化[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
DAI Enliang. Performance research and optimization of double screw conveyors based on discrete element method [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)
- [25] 冯俊小,林佳,李十中,等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J]. 农业机械学报,2015,46(3): 208-213.
FENG Junxiao, LIN Jia, LI Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 208-213. (in Chinese)
- [26] 霍丽丽,孟海波,田宜水,等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报,2012,28(11): 189-195.
HUO Lili, MENG Haibo, TIAN Yishui, et al. Experimental study on physical property of smashed crop straw [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 189-195. (in Chinese)
- [27] 顿国强,陈海涛,冯夷宇,等. 基于 EDEM 软件的肥料调配装置关键部件参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(7):36-42.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, FENG Yining, et al. Parameter optimization and test of key parts of fertilizer allocation device based on EDEM software[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 36-42. (in Chinese)
- [28] 杨星,于克强,王德福. 基于 EDEM 的转轮式 TMR 混合机混合性能数值模拟[J]. 农机化研究,2017,39(3): 218-223.
YANG Xing, YU Keqiang, WANG Defu. Numerical simulation on mixing performance of paddle - wheel total mixed ration mixer based on EDEM [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 218-223. (in Chinese)
- [29] 方开泰. 正交与均匀试验设计[M] // 马长兴. 现代应用数学方法丛书. 北京: 科学出版社, 2001:40-51.
- [30] 贺长彬,景红伟,赵陈成,等. 多自由度沙柳平茬收割机切割装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(11): 320-328.
HE Changbin, JING Hongwei, ZHAO Chencheng, et al. Design and experiment of cutting device of multi - degree - of - freedom sandy willow harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 320-328. (in Chinese)