doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.013

水貂养殖轨道式双排自动饲喂车设计与试验

刘曙光[1]　秦　泉[2]　李　华[1]　尹宝全[1]　南松剑[1]　车忠志[1]

(1. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670; 2. 山东省气候中心, 济南 250031)

摘要: 针对水貂饲喂环节劳动强度大、环境差,水貂饲喂机械化水平不高的问题,设计了一种水貂养殖轨道式双排自动饲喂车,该饲喂车主要包括控制系统、行走系统、输料饲喂系统、饲喂支撑架收展系统。详细分析了饲喂过程中控制系统的控制要求,研究了控制实现方法和动作过程,通过光电传感器与 PLC 准确控制所有电机的工作状态定位转换,实现饲喂电机工作参数的人机交互调整;设计了导向轮定轨结构,优化缩短了饲料输送管路;模仿人工饲喂时手与手臂的动作形式,设计了自动饲喂投食结构,并进行了机构运动学分析,确定了具体结构及运动参数;设计了饲喂车收展结构,并通过作业条件分析确定了结构参数。样机试验结果表明,自动饲喂车以 0.6 m/s 速度行进,以预设的 200、400、600 g 为投喂量,饲喂车实际投喂质量变化范围分别为 165 ~ 210 g、355 ~ 427 g、567 ~ 622 g,饲料堆放质量变异系数分别为 6.53%、3.78%、2.74%,漏喂率均为 0%,满足实际饲喂要求。该自动饲喂车提高了饲喂效率,节约了劳动成本,增加了饲喂车载料量。

关键词: 水貂; 饲喂车; 轨道式

中图分类号: S865.2+2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)09-0108-10　　**OSID**:

Design and Test of Rail-mounted Double-row Automatic Feeding Trolley for Mink Farming

LIU Shuguang[1]　QIN Quan[2]　LI Hua[1]　YIN Baoquan[1]　NAN Songjian[1]　CHE Zhongzhi[1]

(1. *Yantai Academy, China Agricultural University, Yantai* 264670, *China*
2. *Shandong Meteorological Center, Ji'nan* 250031, *China*)

Abstract: In view of high labor intensity and bad labor environment in mink feeding links during the mink farming, low feeding mechanization level of mink in China at present, a kind of rail-mounted double-row automatic feeding trolley for mink farming was developed. The main structure of automatic feeding trolley was composed of the control system, running system, transporting and feeding system, feeding rack extension and retraction system. The control requirement for the integral control system during the work was analyzed, its implementation method and action process were studied, the working state fixed position transition of all motors was precisely controlled by means of photoelectric sensor and PLC, the man-machine interaction adjustment of feeding motor operating parameters was realized; the guide wheel orbit structure was designed and the feed transporting pipeline was optimized and shortened; an automatic feeding structure was designed by simulating action forms of hands and arms in manual feeding, the kinematics of mechanism was analyzed to determine the specific structure and motion parameters; an extension and retraction structure for the feeding trolley was designed, and the determination of structure parameters was carried out by means of operating conditions. The performance test results showed that the ranges of change of actual feeding quality were respectively 165 ~ 210 g, 355 ~ 427 g and 567 ~ 622 g, the stacking mass of feeding stuffs on the cage were respectively 6.53%, 3.78% and 2.74%, the leakage rate for each test was 0%, the actual feeding requirement could be met, when the speed of the feeding trolley was 0.6 m/s, preset feeding quantity was respectively 200 g, 400 g and 600 g. The feeding trolley improved the feeding efficiency, saved the labor cost, and increased the carrying capacity of the feeding trolley.

Key words: mink; feeding trolley; rail-mounted

收稿日期: 2019-12-29　修回日期: 2020-01-20

基金项目: 国家级星火计划项目(2013GA740002)

作者简介: 刘曙光(1980—),男,副教授,博士,主要从事农业机械化工程研究,E-mail: shuguang800511@126.com

通信作者: 车忠志(1973—),男,副教授,主要从事智能农业装备控制研究,E-mail: 326896856@qq.com

0　引言

水貂是重要的毛皮经济动物[1-2]。我国水貂养殖主要分布在东北和山东半岛[3-4]地区。饲喂是水貂设施养殖过程中劳动强度最大的环节之一，而且水貂养殖饲喂环境相对较差，影响劳动者的身心健康。目前，我国猪、牛、羊、鸡等养殖饲喂技术发展很快，饲喂机械化水平较高[5-17]。相比之下，经济动物饲喂技术发展相对较慢。国内外学者对水貂养殖的生活环境、饲料成分、疾病及防治等进行了大量研究[18-25]，但对水貂机械化饲喂环节研究很少。我国水貂饲喂机械化水平较低。本文设计轨道式水貂养殖双排自动饲喂车，实现无人驾驶自动行走、自动分料双排饲喂、自动转弯、自动收展饲喂支撑架、定点停放以备加料等功能，以期提高饲喂效率、节约成本。

1　水貂饲喂形式

我国水貂养殖应用最广泛的饲喂形式与国外相同，即直接将现场加工的鲜料堆放在每个养笼上面的固定位置处（如图 1 所示），较以前的饲喂形式：开养笼—取食盆—装食料—放回养笼—关养笼，饲喂过程更简单，更安全，饲喂效率更高。由于水貂饲料呈粘稠糊状，一般饲料以球状或粗条状堆放在 4 个以上的养笼网孔（笼网规格：25 mm × 25 mm）上，不会迅速下落穿过养笼掉至地面，而是在重力、粘稠力作用下缓慢向养笼内坠悬而不落，笼内的水貂可以不断食用，直至全部吃完。

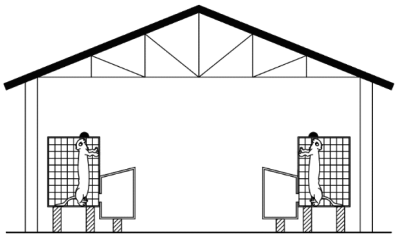


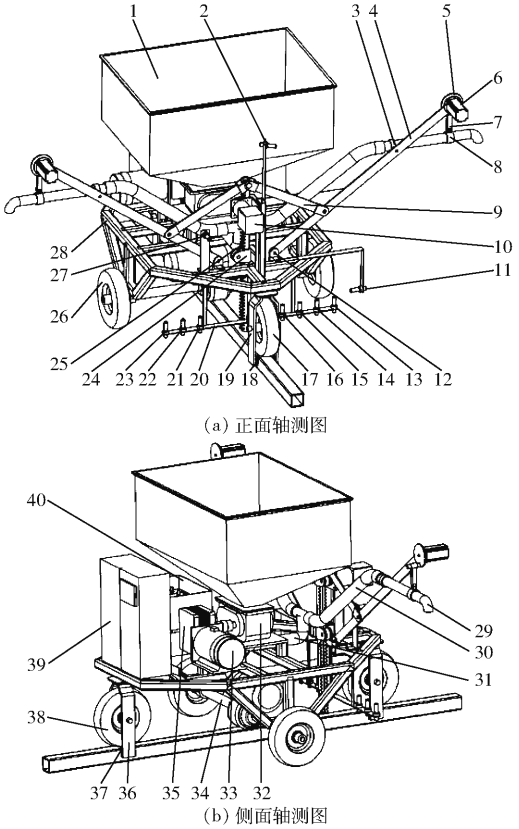
图 1　水貂养殖饲喂形式

Fig. 1　Feeding form of mink farming

我国传统水貂养殖饲喂方式以人工推车载料，人工投料分段进行，目前在我国中小型貂场内仍广泛应用。发达国家水貂养殖饲喂以由人工驾驶载料与人工分料功能集成的饲喂车实现载料与投料同步进行，一些机型可以实现饲料投喂量的预先设定，但饲喂者仍是投喂过程的操作者。近些年，我国一些规模较大的养殖企业、养殖户也采用该技术，较传统的饲喂方式，减轻了水貂养殖饲喂过程中的载料问题，提高了饲喂效率，缩短了劳动者在貂棚内劳动时间，但投喂过程中的驾驶、控制点堆饲料位置与饲喂量大小等，仍靠人工完成，由于饲喂车行进速度较快，增加了劳动强度。

2　结构与工作原理

轨道式双排自动饲喂车包括行走系统、输料饲喂系统、饲喂支撑架收展系统和控制系统，结构如图 2 所示。行走系统按控制流程使车体沿着“S”型轨道在同一貂棚内及不同貂棚间转移行走。输料饲喂系统将料斗内的饲料沿饲料输送管路输送至饲喂钢管末端，投料同时摆动圆盘旋转，使饲喂钢管管口沿圆弧往复摆动一次，模仿人驾驶饲喂时的手与手臂的饲喂动作，将饲料堆放在养笼上，并将钢管口剩余饲料抹到养笼上。饲喂支撑架收展系统通过齿轮齿条结构纵向运动，带动对称的饲喂支撑架在横向



(a) 正面轴测图

(b) 侧面轴测图

图 2　饲喂车结构图

Fig. 2　Structure charts of feeding trolley

1. 料箱　2. 收缩上限光电传感器　3. 饲喂钢管始端连接销　4. 支撑杆　5. 摆动圆盘　6. 饲喂电机　7. 摆杆　8. 饲喂钢管末端连接销　9. 收展带动杆　10. 饲喂支撑架收展电机　11. 饲喂感应光电传感器　12. 饲喂支撑架固定板　13. 光电传感器 7　14. 光电传感器 6　15. 光电传感器 5　16. 光电传感器 4　17. 前导向轮　18. 前导向定轨轮　19. 前导向轮支撑板　20. 光电传感器固定架　21. 光电传感器 3　22. 光电传感器 2　23. 光电传感器 1　24. 齿轮座　25. 齿条　26. 承压轮　27. 展开下限光电传感器　28. 车架　29. 饲喂钢管　30. 饲料输送软管　31. 饲料输送钢管　32. 齿轮泵　33. 齿轮泵驱动电机　34. 电动驱动车桥　35. 减速器　36. 后导向轮支撑板　37. 后导向定轨轮　38. 后导向轮　39. 控制箱　40. 蓄电池组

位置尺寸状态变化,达到收展的效果,以保证在进入每个貂棚开始饲喂前,饲喂支撑架收展系统支撑架带动输料饲喂系统展开,达到工作幅宽,在离开貂棚时,由于貂棚门、过道较窄,饲喂时输料饲喂系统展开的状态在支撑架带动下收缩,便于转移至下一个貂棚。控制系统通过分布在貂棚不同位置工作状态切换点上的传感器信号感应控制饲喂车的状态,保证饲喂作业所有动作过程的精准控制与调整。

3 关键结构设计

3.1 控制系统

根据水貂饲喂过程,饲喂车工作过程主要包括行走非工作过程、行走工作过程、非行走调整过程,饲喂车工作过程各状态与对应位置如图 3 所示。在不同貂棚之间,工作过程相似,应尽可能少用光电传感器,相同的工作过程中,各电机的动作要求尽量相同,以减少程序的编制量,提高应用效率。非行走调整过程为供料位置处装料、饲喂车开始饲喂前,结束饲喂后在貂棚内的工作状态切换过程,主要的工作状态转换在工作状态切换点 1、6(饲喂车供料点),2、4、7(饲喂车分别进入貂棚 1、2、3 后的饲喂前调整),3、5(貂棚 1、2 饲喂结束,准备出貂棚前的调整)。行走工作过程为饲喂车在貂棚内的运动过程,在状态 2、4 过程进行。行走非工作过程为饲喂车在貂棚外的行进过程,在状态 1、3、5 过程进行。控制系统包括 PLC、位置状态转换光电传感器、饲喂状态光电传感器、饲喂支撑架系统收展上下限位置光电传感器、继电器等。控制系统控制内容包括行走驱动电机正反转向、行走过程中的走停控制,齿轮泵驱动电机工作开始时间及持续工作时间控制,饲喂支撑架收展时收展电机正反转向、收展的起止过程控制,饲喂电机转动速度、开始工作时间及持续工作时间控制,各顺序状态电机动作的时间间隔控制,恢复某过程的初始状态控制。控制过程中,每一种动作或过程通过光电传感器感应各个位置上的电机动作指示信号由 PLC 控制各电机工作状态,保证饲喂车在各种位置准确动作。

控制流程如图 4 所示,具体控制饲喂过程如下:

(1)按动控制箱上启动按钮,工作状态切换点 1 处(饲喂供料点)的光电传感器 1 感应信号,饲喂支撑架收展系统呈收缩状态。行走驱动电机(电机 1)、齿轮泵驱动电机(电机 2)、饲喂支撑架收展电机(电机 3)、饲喂电机(电机 4、5)均不工作,延迟预设时间,待到供料结束,电机 1 开始工作,饲喂车处于状态 1,电机 2、3、4、5 均不工作。

(2)当饲喂车行进至工作状态切换点 2 处,光电传感器 2 感应信号,电机 1 停止工作,之后电机 3 工作,饲喂支撑架收展系统由收缩状态展开,直至支撑杆到达下限光电限位传感器感应位置,电机 3 停止工作,展开过程结束。延迟预设时间之后,电机 2 工作,使食料充满整个饲料输送管路,电机 2 停止工作,延迟预设时间后,电机 1 工作,饲喂车开始饲喂,即饲喂车处于状态 2。在状态 2 中,电机 1 一直工作,每个貂笼笼底正下方对应养笼上待投食位置预设一金属条,在饲喂车一侧机架上固定一饲喂感应光电传感器,当饲喂车行走时,光电传感器感应到一金属条信号时,电机 2 工作,投料,之后电机 4、5 从预设位置同时旋转运动,带动摆动圆盘旋转一周,使饲喂钢管绕饲喂钢管始端的销轴摆动,将饲喂钢管口多余的食料抹在养笼上。每当碰到金属条信号,表示该处为饲喂点,饲喂车重复上述动作。在该状态中,电机 2 一直在间歇式工作。

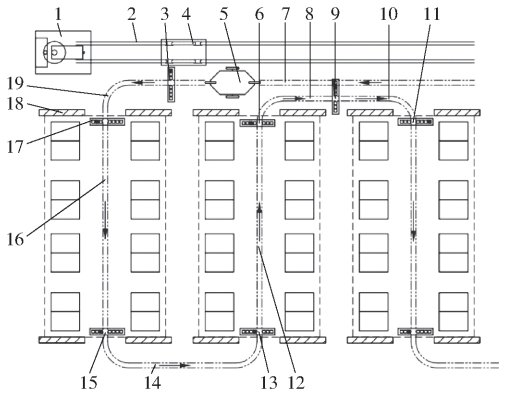


图 3 饲喂车工作过程各状态与对应位置示意图

Fig. 3 Each state and corresponding position in working process of feeding trolley

1. 饲料加工室 2. 供料轨道车行进轨道 3. 工作状态切换点 1(供料点) 4. 供料轨道车 5. 自动饲喂车 6. 工作状态切换点 5 7. 饲喂车行进导向轨道 8. 状态 5 9. 工作状态切换点 6(供料点) 10. 状态 6 11. 工作状态切换点 7 12. 状态 4 13. 工作状态切换点 4 14. 状态 3 15. 工作状态切换点 3 16. 状态 2 17. 工作状态切换点 2 18. 貂棚 19. 状态 1

(3)当饲喂车行进至工作状态切换点 3 处,光电传感器 3 感应信号,电机 1 停止工作,貂棚 1 内水貂饲喂完毕,之后,电机 3 反向转动,饲喂支撑架收展系统开始由展开状态收缩,直至齿条上端上升至上限光电限位传感器感应位置,电机 3 停止工作,整个系统收缩完毕,使饲喂车整体顺利进出貂棚。延迟预设时间之后,电机 1 开始工作,饲喂车处于状态 3。在状态 3 中,饲喂支撑架收展系统保持收缩状态,电机 2、3、4、5 都不工作。

(4)当饲喂车行进至工作状态切换点 4 处,光电传感器 4 感应信号,电机 1 停止工作,饲喂支撑架收展系统由收缩状态展开,延迟预设时间之后,电机 1

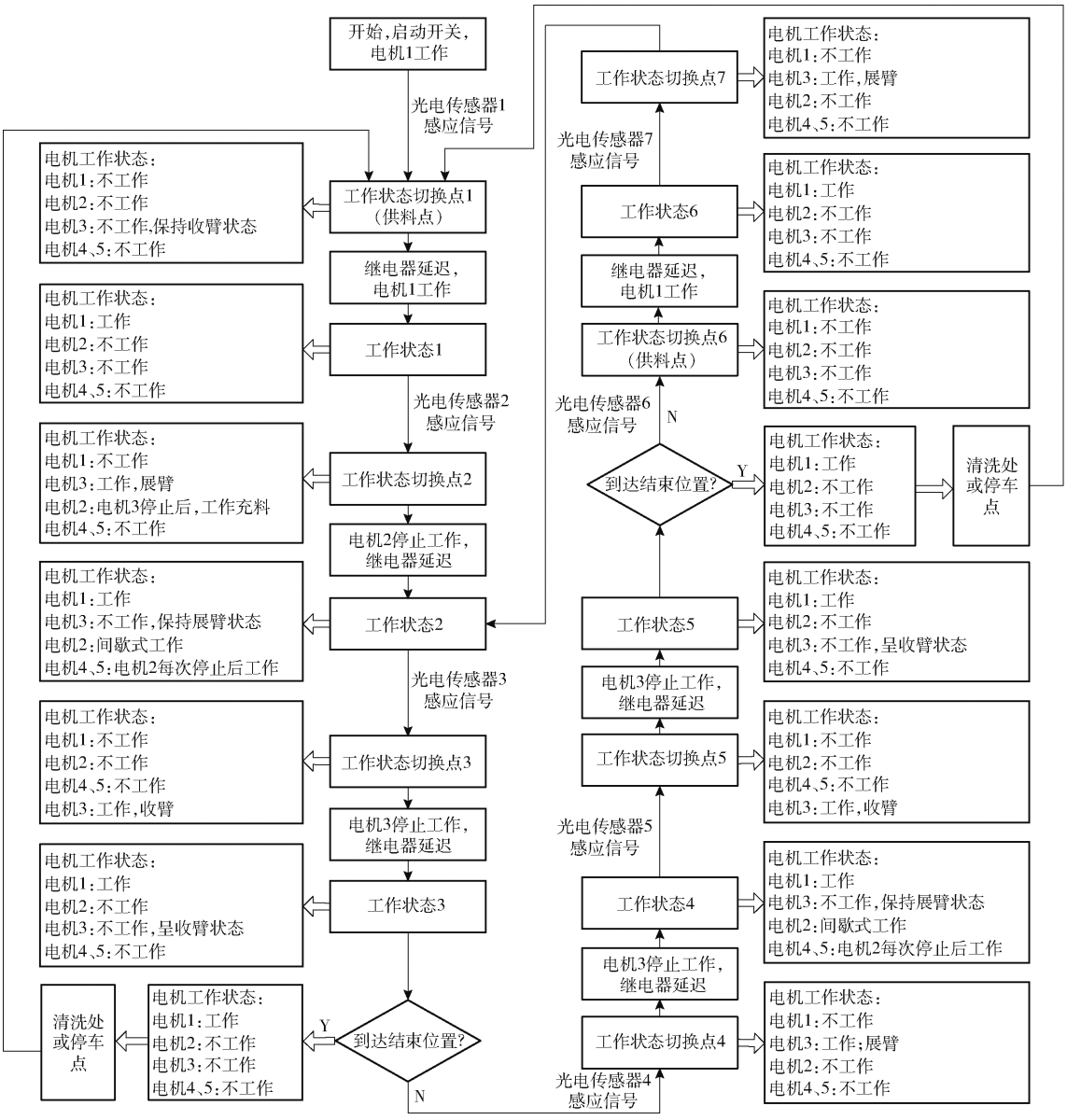


图 4　控制流程图

Fig. 4　Flow chart of control

开始工作,开始饲喂工作状态,过程与状态 2 相同。

(5)当饲喂车行进至工作状态切换点 5 处,光电传感器 5 感应信号,电机 1 停止工作,貂棚 2 内水貂饲喂完毕,饲喂支撑架收展系统由展开状态收缩,延迟预设时间之后,电机 1 开始工作,饲喂车处于状态 5,该状态下,电机 2、3、4、5 均不工作。

(6)当饲喂车行进至工作状态切换点 6 处(供料点),光电传感器 6 感应信号,电机 1 停止工作,补充饲料,延迟预设时间之后,电机 1 开始工作,饲喂车处于状态 6。在状态 6 中,电机 2、3、4、5 均不工作。

(7)当饲喂车行进至工作状态切换点 7 处,可以重复之前的工作过程,光电传感器 2 感应信号,电机 1 停止工作,之后饲喂支撑架收展系统由收缩状态展开。延迟预设时间之后,电机 1 开始工作,饲喂车处于状态 2 中,开始重复状态 2 之后的状态过程。

具体的控制流程根据貂棚的规模、分布从图 4 中截取适合的控制状态,考虑饲喂后饲喂车的清洗、停放适当增加辅助的动作状态。当出现故障或者停电等,需要切换至人工控制状态,即所有电机的工作状态为单独动作,不联动,调整至可以连续工作的位置或者状态,再进行自动模式。

3.2　行走系统

行走系统包括电动车后桥总成、行走驱动电机、机架、承压轮、前轮、后轮及前后导向定轨轮等。考虑饲喂车需要转弯,饲喂车四轮前后各两轮分布定轨结构复杂,轨道多,不利于后退行走,本文设计了前后各一个导向轮、中间两个承压轮的基本行走导向形式,前后导向轮通过前后轮支撑板两侧设定的 2 组导向定轨轮限定在一条轨道上,使饲喂车能够

沿预设轨道直线与曲线前进或者倒退。导向定轨轮在直轨和弯轨上的定轨运动如图 5 所示,各结构参数关系为

$$x_L^2+(2R_0+a+2r)x_L+2R_0(a+2r)-l_{TF}^2-l_{TF}\left[4\left(R_0-\frac{a}{2}+r\right)^2-l_{OF}^2\right]^{\frac{1}{2}}=0 \quad (1)$$

式中 x_L——转弯时导向定轨轮与弯导轨缝隙宽度,mm

R_0——转弯半径,mm

a——轨道宽度,mm

r——导向定轨轮半径,mm

l_{TF}——点 L_3 与点 L_4 之间距离,mm

l_{OF}——点 L_1 与点 L_4 之间距离,mm

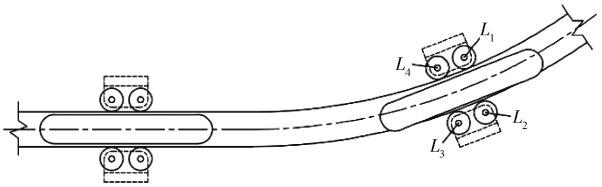


图 5 导向定轨轮定轨运动示意图

Fig. 5 Motion diagram of guide rail wheel

当转弯半径为 1 m、轨道宽度 60 mm、导向定轨轮直径 30 mm、导轨一侧两轮间距 50 mm、导轨两侧轮间距 62 mm 时,转弯过程中,导向定轨轮与弯导轨缝隙宽度 1.97 mm,轨道内侧轮中心和转弯圆心连线与对应的外侧轮中心和转弯圆心连线夹角 0.15°。

电动车后桥总成两端的承压轮在平坦的硬质地面或铺设的平坦钢板上行走,主要起承重作用。行走驱动电机采用 48 V/650 W 直流无刷电机。轨道为方形或矩形钢管,铺设在饲喂车行进的全程,貂棚内轨道由直轨组成,貂棚外轨道由弯轨与直轨组成。

饲喂过程中,行走系统一直工作,是工作效率的直接影响因素,但其工作速度要考虑齿轮泵工作投食的效果,一般设定投食过程行走速度为 0.5 ~ 0.8 m/s。该饲喂车饲喂效率为

$$n=\frac{7\,200vv_0n_0(l_r-l_0)}{l\left[\left(\frac{t_{01}}{2}+t_{02}+t_{03}\right)v_0v+sv+l_rv_0\right]} \quad (2)$$

式中 n——单位时间饲喂水貂数量,只/h

v——貂棚内投食时饲喂车行进速度,m/s

v_0——貂棚外饲喂车行进速度,m/s

n_0——每个间隔养笼内水貂数量,只

l_r——每一貂棚长度,m

l_0——貂棚内沿轨道方向没有养笼分布的过道长度,m

l——每个养笼间隔长度,m

t_{01}——加料工作状态切换点预设停滞时间,s

t_{02}——每一貂棚内饲喂前工作状态切换点准备投料预设停滞时间,s

t_{03}——每一貂棚饲喂后工作状态切换点准备出貂棚预设停滞时间,s

s——相邻貂棚间轨道长度,m

采用目前广泛应用的一侧加料形式,当饲喂车行进速度为 0.6 m/s 时,对于长 0.4 ~ 0.5 m 养笼间隔、单只饲养模式每小时饲喂效率为 1 万只左右,对于长 0.7 ~ 0.8 m 养笼间隔、3 ~ 4 只饲养模式,每小时饲喂效率 1.5 万只以上,为饲喂车人工驾驶熟练操作者饲喂效率 2 倍以上,为完全人工饲喂效率的 10 ~ 20 倍,大大提高了饲喂效率。

3.3 输料饲喂系统

输料饲喂系统包括料箱、齿轮泵、减速电机、饲料输送管路、饲喂电机、摆动圆盘、摆杆、饲喂钢管始末端连接件等。

料箱承载待饲喂的食料,呈四棱料斗状,其体积根据饲喂规模及配套动力确定,应满足条件

$$V=k_1(V_1+4l_r)V_2/l \quad (3)$$

式中 V——料箱体积,mm^3

k_1——预留饲料调整系数

V_1——饲料输送管路充料体积,mm^3

V_2——每一养笼间隔需投喂的饲料体积,mm^3

由于无人驾驶,在动力配置相同的条件下,增加水貂饲料的载料量为

$$q=10^3M_p/(\rho V')\times 100\% \quad (4)$$

式中 q——较人工驾驶增加的载料量,%

M_p——驾驶者体质量,kg

ρ——水貂饲料密度,g/cm^3

V'——人工驾驶饲喂车载料体积,cm^3

当驾驶者体质量 80 kg,人工驾驶饲喂车载料体积 4×10^5 g/cm^3 时,相同动力配置下载料量增加 27%。

齿轮泵上方接料箱下料口,下方与饲料输送管路相连,工作中,不断将料箱中的食料通过一对齿轮旋转压送至饲料输送管路一侧,该过程为饲喂过程执行的核心。齿轮泵的齿轮齿数 $z=8$,模数 $m=10$ mm,宽度 $b=90$ mm。齿轮泵驱动电机 60 V/800 W,经减速器输出转速 640 r/min。齿轮泵实际流量[26]为

$$Q=k_2\pi zm^2bn_g\eta_v/30 \quad (5)$$

式中 Q——实际流量,mm^3/s

k_2——修正系数,取 1.115

n_g——齿轮泵转速,r/min

η_v——齿轮泵容积效率,%

饲料输送管路包括饲料输送钢管、饲料输送软

管、饲喂钢管。饲料输送钢管始端通过法兰盘形式固定于齿轮泵底，饲料输送钢管内径 70 mm。饲料输送钢管水平传输位于饲料传输过程的最低位置，在该位置设置排出口（如图 6 所示），当饲喂结束，对饲料经过部分进行清洗，通过该排出口排出或清理饲喂阻塞。



图 6　饲喂车剩料排出口

Fig. 6　Residue outlet of feeding trolley

饲料输送钢管末端分 2 个支路，分别连接一条饲料输送软管，内径 50 mm，与饲料输送钢管呈“Y”型。饲喂传输软管另一端与饲喂钢管相通，饲喂钢管内径 50 mm。工作中，饲料输送管路一直充满水貂饲料（如图 7 所示），其充料体积为

$$V_1 = \pi(d_1^2 l_{01} + 2d_2^2 l_{02} + 2d_3^2 l_{03})/4 \tag{6}$$

式中　d_1——饲料输送钢管内径，mm

l_{01}——饲料输送钢管长度，mm

d_2——饲料输送软管内径，mm

l_{02}——饲料输送软管长度，mm

d_3——饲喂钢管内径，mm

l_{03}——饲喂钢管长度，mm

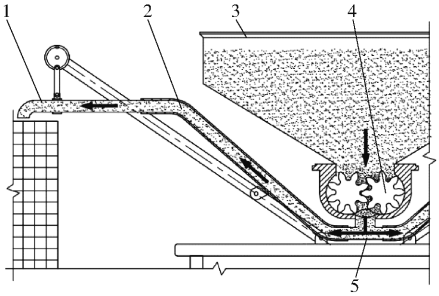


图 7　饲料输送过程示意图

Fig. 7　Feed conveying process

1. 饲喂钢管　2. 饲料输送软管　3. 料箱　4. 齿轮泵　5. 饲料输送钢管

在貂棚 1 内，饲料输送管路内没有饲料，工作前，需要其充满饲料，充料时间为

$$t_1 = V_1/Q \tag{7}$$

式中　t_1——充料时间，s

每一养笼间隔饲喂投料时间为

$$t_2 = 2m_0/(\rho Q) \tag{8}$$

式中　t_2——投料时间，s

m_0——每个养笼间隔预设投喂质量，g

当预设 200、400、600 g 3 种投食量时，齿轮泵流量不变，其投料时间分别为 0.12、0.24、0.35 s。

每一养笼饲喂投料时间与行进速度满足

$$v\left(t_2 + \frac{2\pi}{\omega}\right) \leqslant l \tag{9}$$

式中　ω——摆动圆盘转动角速度，rad/s

当预设 200、400、600 g 3 种投食量时，饲喂钢管在养笼上方的工作距离为 70.8、141.6、211.8 mm，满足投料与行进的关系。

饲喂钢管始端通过销连接于支撑杆上，末端连接件与摆杆通过销连接，摆杆与摆动圆盘支撑杆圆柱铰接，摆杆长度 108 mm，摆动圆盘直径 84 mm，摆动圆盘与饲喂电机均固定在支撑杆末端。饲喂电机为 24 V 步进电机或者伺服电机，驱动摆动圆盘匀速转动，使饲喂钢管绕饲喂钢管始端连接销摆动，模仿人工饲喂时人手与手臂的动作形式。

如图 8 所示，当摆杆与摆动圆盘连接点位于 A'' 时，位于工作空间的最高点，饲喂车处于非工作的行走移动状态。每个饲喂动作过程中，连接点均由初始的 A'' 点绕 O_1 点旋转一周。

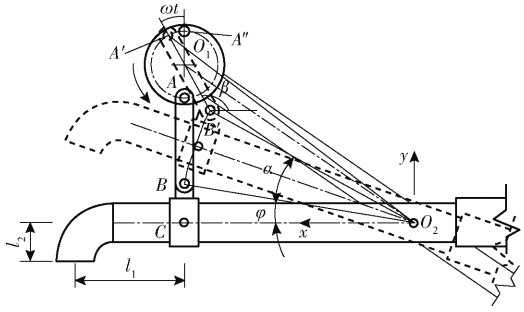


图 8　饲喂钢管工作过程摆动示意图

Fig. 8　Swing of feeding steel pipe in course of work

根据机构结构，确定各结构及运动参数间的关系为

$$l_{O_1O_2}(\sin\gamma_1 + \cos\gamma_1\tan\beta) + l_{O_2A}(\cos(\omega t) + \sin(\omega t)\tan\beta) - l_{O_2B}(\sin(\alpha+\varphi) + \cos(\alpha+\varphi)\tan\beta) = 0 \tag{10}$$

式中　$l_{O_1O_2}$——点 O_1 与点 O_2 之间距离，mm

γ_1——展开状态下，支撑杆与水平方向夹角，(°)

β——摆杆在运动中与水平方向夹角，(°)

l_{O_2A}——点 O_2 与点 A 之间距离，mm

l_{O_2B}——点 O_2 与点 B 之间距离，mm

α——饲喂钢管旋转点 O_2 和其连接点连线与饲喂钢管摆动至最低位置时两点连线夹角，(°)

φ——饲喂钢管旋转点 O_2 和其连接点连线与钢管中心轴线夹角，(°)

$$l_{AB}^2+l_{O_2B}^2-l_{O_1A}^2-l_{O_1O_2}^2-2l_{AB}l_{O_2B}\cos(\beta+\alpha+\varphi)-2l_{O_1A}l_{O_1O_2}\sin(\omega t+\gamma_1)=0 \tag{11}$$

式中 l_{AB}——点 A 与点 B 之间距离,mm

l_{O_1A}——点 O_1 与点 A 之间距离,mm

本机构中,$l_{O_1O_2}=292$ mm,$l_{AB}=90$ mm,$l_{O_2B}=243$ mm,$l_{O_1A}=35$ mm,$\varphi=9.5°$,$A''\rightarrow A$ 过程为饲喂投食过程,当摆杆与摆动圆盘连接点运动到 A 时,O_1A' 与 $A'B'$ 重合,即 $\beta-\omega t=\pi/2$ 时,摆杆与饲喂钢管的连接点到达 B' 点,为连接点到达的最高位置,此时,$\beta=118.9°$,$\omega t=28.9°$,$\alpha=19.2°$。当连接点运动到最低点 A 时,投食过程结束,摆杆与饲喂钢管的连接点也同时到达最低点,$\overset{\frown}{BB'}$ 为在摆动圆盘旋转过程中饲喂钢管运动的轨迹圆弧范围。摆杆与摆动圆盘连接点在 $A\rightarrow A''$ 过程中为返回初始点非投食过程。饲喂钢管末端管口在最高点时,管口中心距离养笼笼面 120 mm;管口最低点与养笼笼面平行,相隔 2 mm,保证钢管在最低点既不与养笼面摩擦,防止破坏机构阻碍行走,又能将管口多余的饲料抹至养笼固定位置上,避免行走时滴漏损失。

3.4 饲喂支撑架收展系统

饲喂支撑架收展系统包括收展电机、齿轮、齿条、收展带动杆、支撑杆、支撑架连接固定板等。通过两个齿轮座及机架连接固定板定位饲喂支撑架收展系统。齿条上端通过上连接销轴与收展带动杆一端连接,收展带动杆另一端与支撑杆通过销轴连接。机架的齿条上方及支撑杆下方位置设有上下限位光电传感器,控制齿条运动行程。当收展电机正转驱动齿轮带动齿条向上运动,收展带动杆、饲喂管支撑杆绕各自销轴向上转动,饲喂支撑架收展系统整体逐渐变窄,当齿条运动到达固定于机架上的上限位光电传感器时,收缩过程结束,整个系统呈收缩状态,如图 9 所示。当收展电机反转驱动齿轮带动齿条向下运动,收展带动杆、饲喂管支撑杆绕各自销轴向下转动,饲喂支撑架收展系统整体逐渐变宽,当支撑杆到达下限位光电感应位置时,展开动作过程结束,整个系统呈展开状态,如图 10 所示。饲喂支撑架收展系统收展状态示意图如图 11 所示。

收展过程齿条运动范围为

$$l_{DE}(\sin\theta_2-\sin\theta_1)+l_{O_3D}(\sin\gamma_2-\sin\gamma_1)<l_3 \tag{12}$$

式中 l_{DE}——点 D 与点 E 之间距离,mm



图 9 饲喂车收缩状态

Fig. 9 Extension state of feeding trolley



图 10 饲喂车展开状态

Fig. 10 Retraction state of feeding trolley

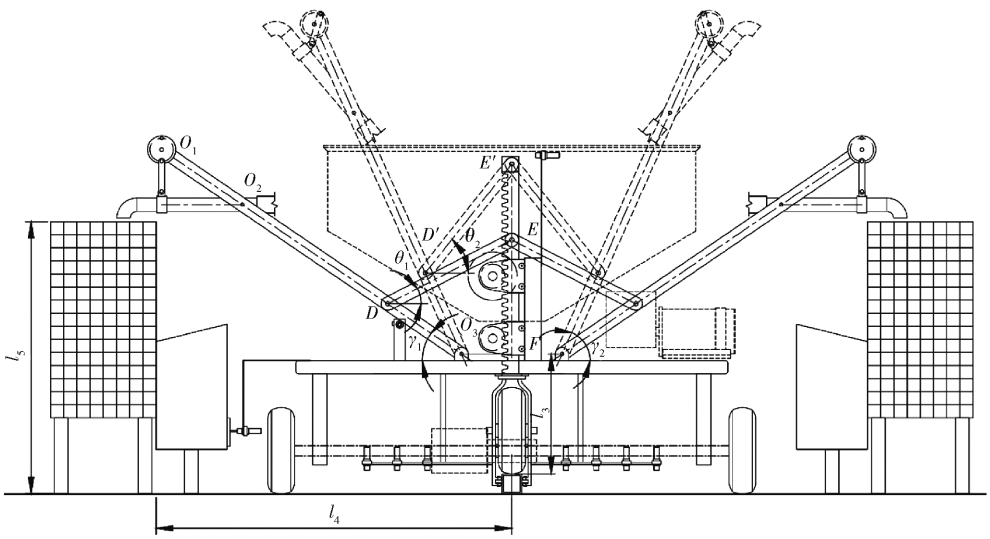


图 11 饲喂支撑架收展系统收展状态示意图

Fig. 11 Extension and retraction state of feeding rack extension and retraction system

θ_2——收缩状态下收展带动杆与水平方向夹角，(°)

θ_1——展开状态下收展带动杆与水平方向夹角，(°)

l_{O_3D}——点 O_3 与点 D 之间距离，mm

γ_2——收缩状态下支撑杆与水平方向夹角，(°)

l_3——轨道上表面与支撑杆旋转中心之间竖向距离，mm

收缩完成后满足要求

$$l_{O_3F} + l_{O_1O_3}\cos\gamma_2 \leqslant l_d/2 \tag{13}$$

式中　l_{O_3F}——点 O_3 与点 F 之间距离，mm

$l_{O_1O_3}$——点 O_1 与点 O_3 之间距离，mm

l_d——貂棚门宽度，mm

展开完成后，饲喂结构满足的水平位置要求

$$100\ \text{mm} \leqslant l_{O_3F} + l_{O_1O_3}\cos\gamma_1 + l_1 - l_4 \leqslant 150\ \text{mm} \tag{14}$$

式中　l_1——点 C 与饲喂钢管管口中心点轴向距离，mm

l_4——轨道沿走向竖直对称面与养笼靠轨道一面距离，mm

展开完成后，饲喂结构满足的高度要求

$$0 \leqslant l_3 + h + l_{O_2O_3}\sin\gamma_1 - l_2 - l_5 \leqslant 2\ \text{mm} \tag{15}$$

式中　h——轨道高度，mm

$l_{O_2O_3}$——点 O_2 与点 O_3 之间距离，mm

l_2——饲喂钢管管口中心点到饲喂钢管轴线距离，mm

l_5——养笼上表面与轨道铺设地面距离，mm

4　样机试验

4.1　试验仪器与材料

饲喂车、饲喂车行进轨道、电子天平、直尺、4 块木板(长 × 宽：4.5 m × 0.2 m)、支架、塑料板、铲子、勺子、体积测量杯、水貂饲料。

4.2　试验方法

试验之前，用勺子将加工好的水貂饲料加入体积测量杯，测量体积，称量，得出本次试验用水貂饲料密度为 0.743 g/cm^3。通过 PLC 一体机输入密度值，并输入每个养笼上放置饲料质量。

在平整的水泥试验场地将饲喂车行进轨道铺设在地面上，将支架布置在沿轨道长边的两侧，4 块木板对齐放置在支架上，调整支架高度，使木板上面距离地面高度 0.75 m，调整轨道两边的木板到轨道的距离均为 1 m，在 4 块木板上沿饲喂车行进方向对齐的位置划分 10 个连续 400 mm 区域为养笼长度，按饲喂车行进顺序编号，进行两个模拟貂棚的水貂饲喂车现场作业试验。试验现场平面示意图如图 12 所示，试验现场如图 13 所示。饲喂车以 0.6 m/s 的速度行进，因养笼规格不同，每只养笼一般有 1 ~ 4 只水貂，试验设置饲喂量为 200、400、600 g，饲喂车在供食点停止后，检查漏喂的区域范围数量，用铲子将每个养笼范围内的水貂饲料铲到塑料板上，逐一测量其质量。每种饲料量试验重复 3 次。

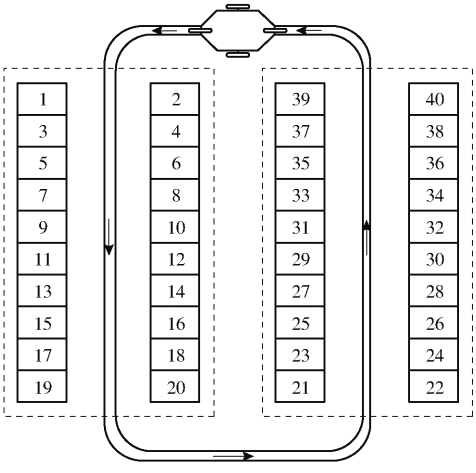


图 12　试验现场平面示意图

Fig. 12　Plan drawing of test site

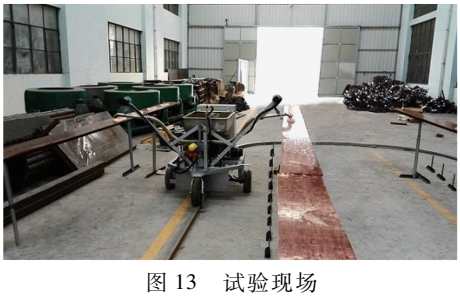


图 13　试验现场

Fig. 13　Experiment scene

4.3　试验指标

漏喂率为

$$N = \frac{n'}{40} \times 100\% \tag{16}$$

式中　N——漏喂率，%

n'——漏喂养笼数量，个

饲料堆放质量变异系数

$$M = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{40} \frac{(m_i - \overline{m})^2}{39}}}{\overline{m}} \times 100\% \tag{17}$$

式中　M——饲料堆放质量变异系数，%

m_i——第 i 养笼饲料堆放质量，g

$\overline{m}$——饲料堆放质量平均值，g

4.4　试验结果与分析

试验结果如图 14 ~ 16 所示。当饲喂量预设为

200 g 时,实际投喂质量变化范围为 165 ~ 210 g,养笼上饲料堆放质量平均值为 188.87 g,整体误差为 5.57%,饲料堆放质量变异系数为 6.53%,3 次试验漏喂率均为 0%。当饲喂量预设为 400 g 时,实际投喂质量变化范围为 355 ~ 427 g,养笼上饲料堆放质量平均值为 392.55 g,整体误差为 1.87%,饲料堆放质量变异系数为 3.78%,漏喂率均为 0%。当饲喂量预设为 600 g 时,实际投喂质量变化范围为 567 ~ 622 g,养笼上饲料堆放质量平均值为 593.78 g,整体误差为 1.1%,饲料堆放质量变异系数为 2.74%,漏喂率均为 0%。

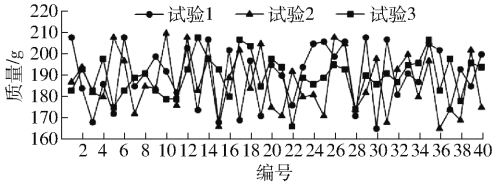


图 14 饲喂量为 200 g 时实际投食量

Fig. 14 Actual amount of food fed when preset feeding amount was 200 g

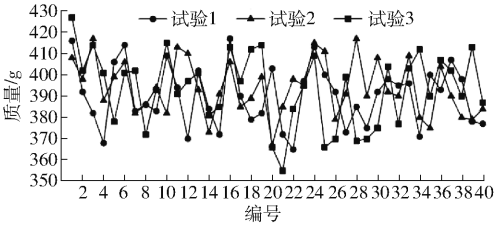


图 15 饲喂量为 400 g 时实际投食量

Fig. 15 Actual amount of food fed when preset feeding amount was 400 g

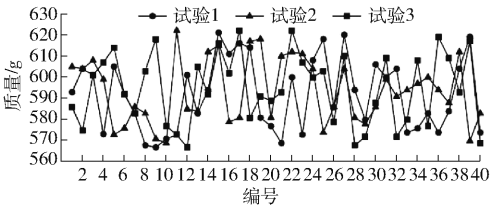


图 16 饲喂量为 600 g 时实际投食量

Fig. 16 Actual amount of food fed when preset feeding amount was 600 g

5 结论

(1)设计了适用于我国水貂养殖的轨道式双排自动饲喂车,详细分析了饲喂过程中控制系统的控制要求,研究了控制实现方法和实现动作过程,通过光电传感器与 PLC 准确控制所有电机的工作状态定位转换,并实现饲喂电机工作参数及电机延迟工作时间的人机交互调整;设计了饲喂车的定轨结构,优化缩短了饲喂输料管路;模仿人工饲喂的手臂动作形式,设计了自动饲喂投食结构,并进行了机构运动学分析,确定了其结构及运动参数;设计了饲喂车收展结构,通过作业条件分析确定了结构参数。该饲喂车可以实现无人驾驶自动行走、自动分料双排饲喂、自动收展饲喂支撑架、定点停放以备加料等功能。

(2)样机试验结果表明,该饲喂车以 0.6 m/s 速度行进,以预设的 200、400、600 g 为投喂量,饲喂车实际投喂质量变化范围分别为 165 ~ 210 g、355 ~ 427 g、567 ~ 622 g,饲料堆放质量变异系数分别为 6.53%、3.78%、2.74%,漏喂率均为 0%,满足实际饲喂要求。

参 考 文 献

[1] 任战军,叶翔杨,宫瑞光,等. 现代毛皮动物养殖业发展方向与关键技术[J]. 经济动物学报,2016,20(2):63 - 68,60.
REN Zhanjun, YE Xiangyang, GONG Ruiguang, et al. Industrial development direction and key technology of the modern fur animal breeding[J]. Journal of Economic Animal, 2016,20(2):63 - 68,60. (in Chinese)

[2] 张立垚,周学红,王惠,等. 哥本哈根、赫尔辛基部分品种水貂皮十年拍卖数据分析[J]. 野生动物学报,2017,38(1):110 - 114.
ZHANG Liyao, ZHOU Xuehong, WANG Hui, et al. Fur auction data analysis of some mink breeds in Copenhagen and Helsinki in the past decade[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2017,38(1):110 - 114. (in Chinese)

[3] 杨景晁,曲绪仙,马泽芳,等. 山东省毛皮动物养殖业发展现状与对策[J]. 经济动物学报,2013,17(1):41 - 44.
YANG Jingchao, QU Xuxian, MA Zefang, et al. Development status and strategy of fur animal breeding in Shandong Province [J]. Journal of Economic Animal, 2013,17(1):41 - 44. (in Chinese)

[4] 王光,崔凯,郑菲菲,等. 山东省水貂养殖环境调查[J]. 黑龙江畜牧兽医,2016(22):201 - 204.

[5] 王德福,黄会男,张洪建,等. 生猪养殖设施工程技术研究现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):1 - 14.
WANG Defu, HUANG Huinan, ZHANG Hongjian, et al. Analysis of research status and development on engineering technology of swine farming facilities[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11):1 - 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181101&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.001. (in Chinese)

[6] 庞昌乐,程进,张东旭,等. 猪舍轨道式自动送料系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):122 - 129.
PANG Changle, CHENG Jin, ZHANG Dongxu, et al. Design and experiment of orbital feeding system for pig housing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(9):122 - 129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180914&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.014. (in Chinese)

[7] 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/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):52 - 56.
MENG Hewei, GUO Yuehu, GAO Zhenjiang, et al. Design and experiment on dual-mode self-propelled precise feeding equipment for dairy cow[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):52 - 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130211&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.

2013.02.011.(in Chinese)
[8] 孟超英,王佳,陈红茜,等.基于分布式对象的蛋鸡舍设施养殖数字化智能监测系统[J/OL].农业机械学报,2017,48(10):292 - 299.
MENG Chaoying, WANG Jia, CHEN Hongqian, et al. Intelligent monitoring system based on distributed object for layer house [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(10):292 - 299. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20171037&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.037.(in Chinese)
[9] 黄会男,王德福,李百秋,等.保育猪饲喂器设计与排料性能试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(10):154 - 162.
HUANG Huinan, WANG Defu, LI Baiqiu, et al. Design and experiment of discharging performance of feeder for nursery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):154 - 162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181017&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.017.(in Chinese)
[10] 刘莫尘,马郡祥,韩守强,等.固态发酵饲料自动发酵饲喂一体设备设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(11):141 - 147.
LIU Mochen, MA Junxiang, HAN Shouqiang, et al. Design and experiment of automatic fermenting and feeding equipment for solid-state fermented feed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11):141 - 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181116&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.016.(in Chinese)
[11] 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)
[12] 杨柳,李保明.蛋鸡福利化养殖模式及技术装备研究进展[J].农业工程学报,2015,31(23):214 - 221.
YANG Liu, LI Baoming. Research progress of welfare-oriented breeding mode and technical equipments for laying hen[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 214 - 221.(in Chinese)
[13] 张伏,王亚飞,吕美,等.仔猪自动精细饲喂系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(7):39 - 45.
ZHANG Fu, WANG Yafei, LÜ Mei, et al. Design and experiment of auto-precision feeding system for piglets[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(7):39 - 45. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180705&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.005.(in Chinese)
[14] 朱军,麻硕士,慕厚春,等.种猪自动精细饲喂系统设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(12):174 - 177.
ZHU Jun, MA Shuoshi, MU Houchun, et al. Design of auto-precision feeding system for pigs[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(12):174 - 177.(in Chinese)
[15] 倪志江,高振江,蒙贺伟,等.智能化个体奶牛精确饲喂机设计与实验[J].农业机械学报,2009,40(12):205 - 209.
NI Zhijiang, GAO Zhenjiang, MENG Hewei, et al. Design and experiment on intelligent precising feeding machine for single dairy cow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(12):205 - 209.(in Chinese)
[16] 李景彬,郭庆贺,温宝琴,等.自走式肉羊饲喂机的设计与试验[J].农机化研究,2016,38(3):218 - 221.
LI Jingbin, GUO Qinghe, WEN Baoqin, et al. Design and test of the self-propelled machine of sheep feeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(3):218 - 221.(in Chinese)
[17] 张小栓,张梦杰,王磊,等.畜牧养殖穿戴式信息监测技术研究现状与发展分析[J/OL].农业机械学报,2019,50(11):1 - 14.
ZHANG Xiaoshuan, ZHANG Mengjie, WANG Lei, et al. Research status and development analysis of wearable information monitoring technology in animal husbandry[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(11):1 - 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20191101&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.001.(in Chinese)
[18] JENSEN V F, SOMMER H M, STRUVE T, et al. A cross-sectional field study on potential associations between feed quality measures and usage of antimicrobials in commercial mink (Neovison vison)[J]. Preventive Veterinary Medicine, 2017,143:54 - 60.
[19] SCHWARZER A, KAESBERG A K, BERGMANN S, et al. Activity rhythms and use of nest boxes of juvenile mink in seminatural group housing[J]. Journal of Veterinary Behavior, 2017, 18:13 - 22.
[20] HANSEN S W, MOLLER S H. Diurnal activity patterns of farm mink (Mustela vison) subjected to different feeding routines [J]. Applied Animal Behaviour Science, 2008, 111(1 - 2):146 - 157.
[21] HANSEN S W, MOLLER S H, DAMGAARD B M. Feed restriction and tubes for environmental enrichment in growing mink—consequences for behaviour and welfare[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2011,134(3 - 4):193 - 200.
[22] JENSEN V F, SOMMER H M, STRUVE T, et al. Factors associated with usage of antimicrobials in commercial mink (Neovison vison) production in Denmark[J]. Preventive Veterinary Medicine, 2016,126:170 - 182.
[23] SCHWARZER A, BERGMANN S, MANITZ J, et al. Behavioral studies on the use of open water basins by American mink (Neovison vison) [J]. Journal of Veterinary Behavior, 2016, 13:19 - 26.
[24] JACOBSEN H J, KOUSOULAKJ K, SANDBERG A S, et al. Enzyme pre-treatment of soybean meal: effects on non-starch carbohydrates, protein, phytic acid, and saponin biotransformation and digestibility in mink (Neovison vison) [J]. Animal Feed Science and Technology, 2018,236:1 - 13.
[25] NIELSEN B L. Making sense of it all: the importance of taking into account the sensory abilities of animals in their housing and management [J]. Applied Animal Behaviour Science, 2018,205:175 - 180.
[26] 成大先.机械设计手册[M].5 版. 北京:化学工业出版社,2008.