

郑伟,龚东军,周健伟,等.层叠式笼养鸭清粪带动态纠偏系统设计[J].华中农业大学学报,2025,44(2):62-72.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.007

层叠式笼养鸭清粪带动态纠偏系统设计

郑伟¹,龚东军^{1,2},周健伟¹,侯帅凯¹,黄开虎¹,王树才¹,李玲³

1.华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070;

2.武汉软件工程职业学院(武汉开放大学),武汉 430205;

3.湖北神丹健康食品有限公司,安陆 432600

摘要 为解决层叠式笼养鸭养殖过程中出现的清粪带跑偏问题,设计了一种清粪带动态纠偏系统,由跑偏检测装置、纠偏执行装置、控制系统等组成。首先,通过布置在清粪带两侧的6个压力传感器实时监测清粪带的运行状态,当清粪带跑偏时,其侧边会推动跑偏检测装置中的防跑偏器,使跑偏一侧的3个压力传感器的压力值发生变化,通过这种变化间接推断出清粪带的跑偏方向及偏移量,当STM32单片机根据采集的各传感器数据判定清粪带跑偏时,会自动控制两侧步进电机运动,从而调节滚筒两端沿滑轨前后移动实现纠偏。同时引入了Fuzzy-PID控制算法,通过位移传感器进行反馈实现闭环控制,以提高控制系统的稳定性和控制精度。试验结果显示,整体纠偏成功率为85%,平均偏差值17 mm,平均相对偏差16%。结果表明,该清粪带动态纠偏系统基本满足层叠式笼养鸭养殖场对清粪带自动化纠偏的要求,极大地减轻养殖人员的劳动强度。

关键词 清粪带;纠偏;自动调节;模糊控制;压力传感器;笼养鸭

中图分类号 S817.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0062-11

笼养鸭是一种将蛋鸭全程放置于笼具中饲养的养殖模式,具有污染低,效益高的优点,已在多地探索和推广应用^[1-3]。清粪设备是笼养鸭养殖过程中不可或缺的装备,其主要功能是将掉落在清粪带上的蛋鸭排泄物集中输送至鸭舍外,由于鸭粪的水分高达70%~75%^[4],在运行过程中清粪带上的较稀的粪尿混合物会渗透至滚筒表面导致摩擦系数降低,造成清粪带在运行过程中受力不均、偏离中心线,发生跑偏^[5]。目前在养殖场中清粪带的纠偏工作主要依靠人工完成,存在纠偏不及时、劳动强度大等问题。因此,研究清粪带的自动纠偏系统对于实际生产具有重要意义。

清粪带大多采用PVC或PP材质的输送带,目前在输送带跑偏理论和纠偏方法上国内外学者进行了大量的研究。郭雨等^[6]比较了不同滚筒形状对传送带跑偏的影响,分析得出鼓形和锥形滚筒因其结构力学特性有一定的自动纠偏效果。陈计远等^[7]针对兔养殖业中带式清粪机的跑偏问题,利用对射式光电传感器设计了1套检测装置,但该装置无法检测偏

移量,且后续仍需人工纠偏。杨滨^[8]针对煤矿运输中输送带跑偏问题,设计了基于角度传感器和PLC的自动纠偏装置,试验结果表明该套装置使跑偏事故发生率下降了80%。朱亮等^[9]提出了LTSA+GRNN+ELM和CDBN+ELM这2种在线跑偏量预测模型,应用在不同皮带秤、不同流量下的预测精度均超过90%。张仕林^[10]使用有限元软件对输送带节点偏移量随时间变化趋势进行了分析,并通过正交试验发现摩擦系数对输送带跑偏的影响要大于滚筒倾角对其的影响。汪列文^[11]通过建立故障树模型对输送带的跑偏进行针对性预防,以此降低跑偏发生的概率。Yang等^[12]设计了输送带在线监测系统,使用CCD相机在高亮度光源下拍摄高质量输送带图片,经过快速图像分割算法检测输送带的裂纹和跑偏。Zhang等^[13]提出了基于深度学习的输送带跑偏检测方法,检测精度可达90%。

目前纠偏系统的研究多以煤矿输送带或带式输送机为研究对象,而针对笼养鸭养殖设备中清粪带纠偏的研究则较少。由于鸭舍内光照等环境因素的

收稿日期:2024-04-10

基金项目:武汉市属高校产学研项目(CXY202016);中央高校基本科研业务费专项(2662020GXPY005)

郑伟,E-mail:1743363960@qq.com

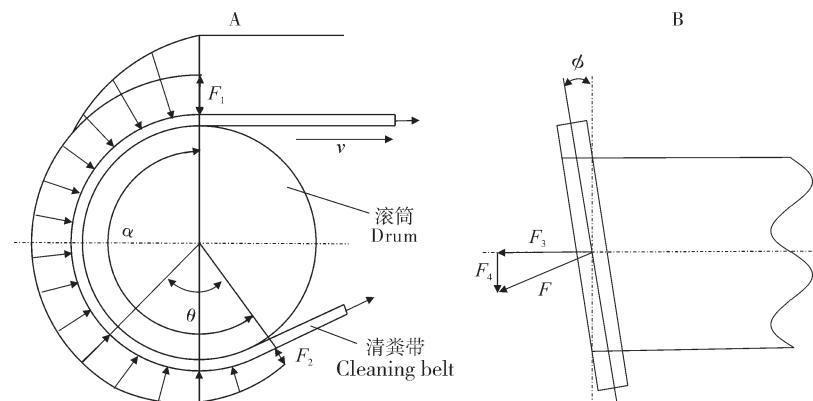
通信作者:龚东军,E-mail:158798051@qq.com

限制以及清粪输送设备与其他输送机结构不同等原因,使得无法照搬现有的纠偏系统。针对以上情况,本研究以层叠式笼养鸭清粪带为研究对象,设计一套动态纠偏系统,采用薄膜压力传感器检测清粪带的跑偏,使用步进电机作为动力器件执行纠偏,以STM32为核心构建控制系统,通过人机交互界面查看运行状态,并对该套纠偏系统的性能进行了试验研究,旨在为提高笼养鸭养殖设备的自动化水平提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 跑偏成因与纠偏方法

造成清粪带跑偏的主要原因有2个:一是笼养鸭排泄物的水分含量较高,在运行过程中滚筒不可避免地会黏附排泄物导致滚筒与清粪带之间的摩擦系数降低导致跑偏;二是清粪带两侧禽粪分布不均受力不平衡,滚筒轴线与清粪带中心线不垂直导致清粪带逐渐向滚筒一端运动发生跑偏。清粪带运行过程中的受力情况如图1所示,在图1A中根据欧拉公式,包角 α 范围内,滚筒在 θ 处单位面积受到的摩擦力为^[14]:



A:滚筒周向受力 Circumferential force on the drum; B:清粪带受力 Force on the cleaning belt.

图1 滚筒和清粪带受力图

Fig.1 Forces on the drum and cleaning belt

1.2 纠偏系统结构设计

1)整体设计。利用三维建模软件Solidworks对纠偏系统结构进行了设计,原有笼养设备尺寸通过测绘得出,并在此基础上综合考虑实际安装要求以及部分选型元器件尺寸设计了该自动纠偏机构,整体结构如图2所示,主要由笼架、清粪带、传动装置、跑偏检测装置、纠偏执行装置、反馈检测系统等组成。层叠式蛋鸭笼养设备中清粪带位于每层鸭笼的

$$f = \mu P = \frac{2\mu F_2 e^{\mu\theta}}{bd} \quad (1)$$

式(1)中, μ 为清粪带与滚筒间摩擦系数; P 为滚筒所受面压力, N ; F_2 为清粪带相遇点的张力, N ; θ 为清粪带与滚筒的相遇点至该处的角度,rad; b 为清粪带宽度,mm; d 为滚筒直径,mm。

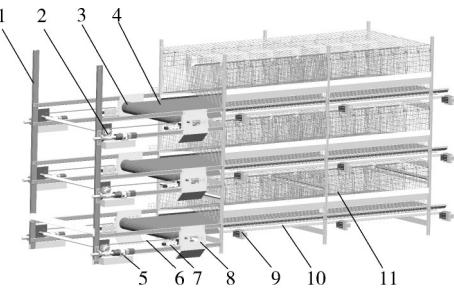
图1B中当滚筒轴线与清粪带中心线不垂直,滚筒倾角为 φ 时,清粪带所受拉力 F 可分解为清粪带纵向运行的驱动力 F_3 和侧向力 F_4 ,其中侧向力大小为:

$$F_4 = F \sin \phi \quad (2)$$

拉力 F 所产生的侧向力 F_4 是使清粪带跑偏最主要的因素,当清粪带所受侧向力 F_4 大于其与滚筒之间的摩擦力时会发生跑偏。当前的纠偏方式为人工调节滚筒消除偏移角以减小清粪带所受侧向力防止其跑偏,或是利用侧向力使已跑偏的清粪带回归至正常状态,例如当清粪带向左侧跑偏时,先调节滚筒右端适当向后移动,放松右侧,使清粪带右侧与滚筒之间的压力减小,然后将滚筒左端向前移动,拉紧左侧,促使清粪带逐渐向右偏移,实现纠偏。从跑偏成因与纠偏方法出发,设计一套纠偏系统代替人工自主进行跑偏检测与动态纠偏。

下方,在每层靠近从动滚筒一端的两侧有6个带压力传感器的跑偏检测装置安装于侧边挡板上(图3),压力传感器1-3和2-3至滚筒轴线的距离为0.5 m,同侧2个压力传感器的距离为1.2 m,其功能为通过压力传感器感知清粪带侧边压力,根据压力值大小间接判定其运行状态。纠偏执行装置位于靠近链轮处,由步进电机、蜗轮蜗杆传动机构等组成(图4),通过步进电机和减速器带动蜗轮蜗杆运动,与蜗轮安装

于同一轴上的链轮带动链条调节滑动拉板沿滑轨前后移动,进而带动滚筒端部随之一同运动进行纠偏。当清粪带向一侧跑偏时,该侧纠偏执行装置中电机反转使滑动拉板前移拉紧该侧,此时该侧滚筒与清粪带之间的压力增大,同时另一侧的电机正转使滑动拉板后移放松,实现纠偏,待纠偏完成后两侧电机执行相反动作使滚筒两端回至原位。



1. 笼架 Cage frame; 2. 链轮 Sprocket; 3. 滚筒 Drum; 4. 清粪带 Cleaning belt; 5. 纠偏执行装置 Correction execution device; 6. 链条 Chain; 7. 位移传感器 Displacement sensor; 8. 滑动拉板 Sliding pull plate; 9. 跑偏检测装置 Deviation detection device; 10. 侧边挡板 Side baffle; 11. 鸭笼 Duck coop.

图2 纠偏系统整体结构

Fig.2 Overall structure of correction system

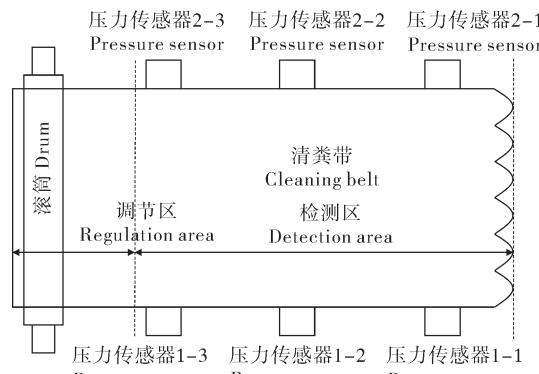
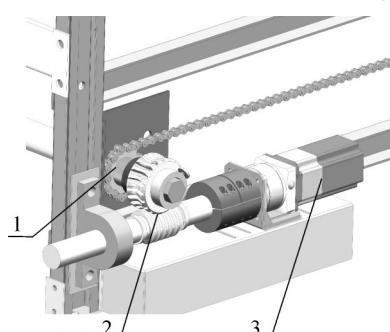


图3 压力传感器分布示意图

Fig.3 Pressure sensor distribution diagram



1. 链轮 Sprocket; 2. 蜗轮蜗杆 Worm gear and worm; 3. 步进电机 Stepper motor.

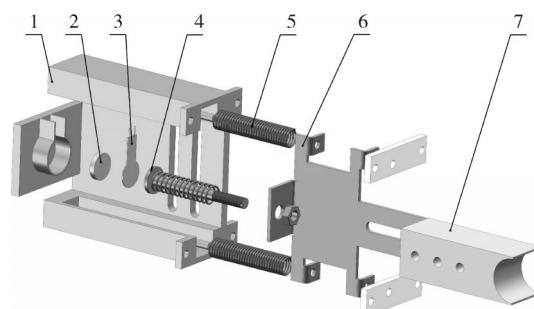
图4 纠偏执行装置

Fig.4 Correction execution device

2) 跑偏检测装置设计。跑偏检测装置结构如图5所示,其主要由安装板、压力传感器、防跑偏器等组成。当清粪带发生跑偏时会与防跑偏器接触摩擦,推动防跑偏器与滑动板向内侧运动,此时安装于滑动板上的按压杆前端会按压压力传感器,使传感器的电阻值发生变化,以此检测清粪带跑偏。当清粪带恢复至正常运行状态后,在复位弹簧弹力作用下推动防跑偏器和滑动板向外侧运动,使其恢复初始状态。其中,压力传感器所受压力为:

$$F = F_1 - F_2 \quad (3)$$

式(3)中, F 为传感器所受压力, N ; F_1 为清粪带对防跑偏器的推力, N ; F_2 为上下两复位弹簧弹力之和, N 。



1. 安装板 Mounting panel; 2. 垫片 Gasket; 3. 压力传感器 Pressure sensor; 4. 按压杆 Press bar; 5. 复位弹簧 Return spring; 6. 滑动板 Sliding plate; 7. 防跑偏器 Anti deviation device.

图5 跑偏检测装置爆炸视图

Fig.5 Deviation detection device explosion view

1.3 控制系统设计

1) 控制系统硬件组成。层叠式笼养鸭每一层的纠偏控制系统均相同,单层的纠偏控制系统硬件组成见图6,其中压力传感器为RP-C18.3-ST梳形薄膜压力传感器,电压转换模块可将压力传感器的电阻信号转换为电压信号,经A/D转换后被STM32控制器读取。位移传感器与对射式光电传感器(型号E3F-20C1/L)组成反馈检测系统,当清粪带跑偏后偏移量超出设定范围时对射式光电传感器发射端发出的信号会被清粪带遮挡而无法被接收端接收,此时接收端会向控制器发送信号触发报警,位移传感器用于测量纠偏时滑动拉板位置,并向STM32反馈纠偏执行数据。步进电机(型号57BYG250H)作为动力输出器件,可将脉冲信号转换为角位移信号^[15],通过控制其角位移量调节滚筒两端移动的距离。PC用于接收控制器发送的数据并在人机交互界面中显示,便于工作人员查看系统运行状况,同时可向控制器下发指令,控制系统部分硬件参数见表1。

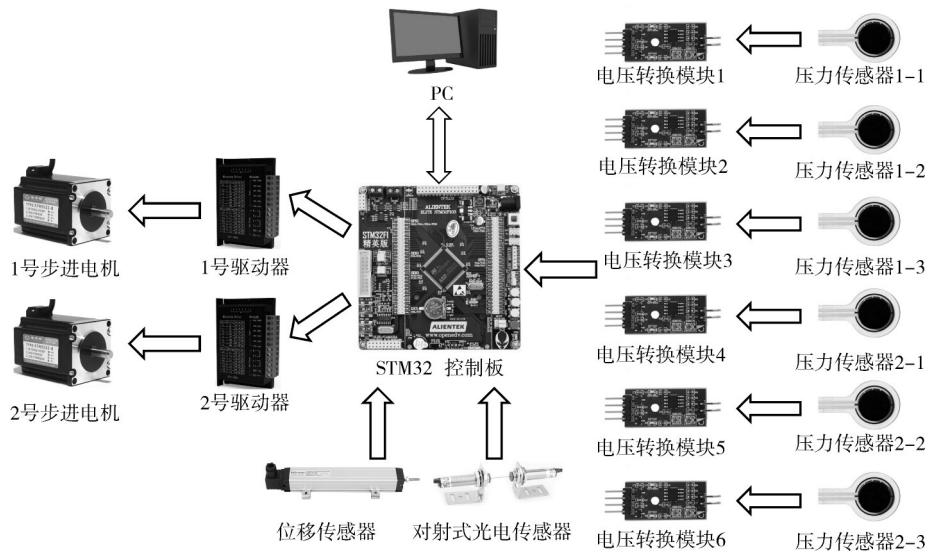


图6 控制系统硬件组成

Fig.6 Control system hardware composition

表1 控制系统硬件参数

Table 1 Control system hardware parameters

器件 Device	参数 Parameter	数值 Value
STM32F103ZET6	外部A/D转换通道数 Number of external A/D conversion channels	16
	GPIO引脚数 Number of GPIO pins	112
	定时器数量 Number of timers	8
	量程/N Range	60
压力传感器 Pressure sensor	24 h漂移量/% Drift quantity	<5
	使用寿命/万次 Service life	>10
	静矩/(N·m) Static torque	2.8
步进电机 Stepper motor	步距角/(°) Step angle	1.8
	行程/mm Stroke	75
位移传感器 Displacement sensor	线性精度/% Linear accuracy	±0.05
	重复精度/mm Repetition accuracy	0.01

2)运行状态判定。为使STM32能准确计算压力值进而判定运行状态,先对RP-C18.3-ST梳形薄膜压力传感器进行标定,该传感器量程60 N,查阅说明书得知其有效感应区域直径为14.5 mm,标定时发现当该传感器所受压力小于20 N时其电阻值变化明显,大于20 N时变化幅度较小,故小于20 N时从

1 N开始每次增加1 N的压力测量其电阻值,大于20 N时每次增加10 N测量其电阻值,共得出24组数据后进行曲线拟合,最终得到其压力-电阻拟合关系曲线(图7),拟合度 $R^2=0.98$ 。

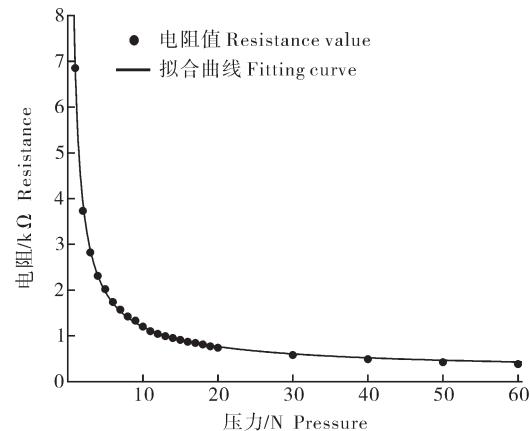


图7 压力传感器压力-电阻拟合曲线

Fig.7 Pressure-resistance fitting curve of pressure sensor

拟合曲线的回归方程为:

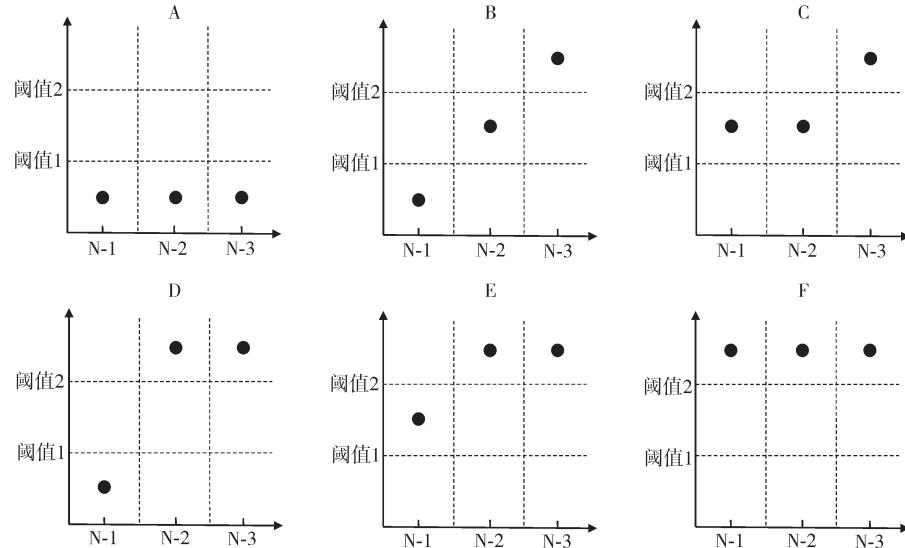
$$y = 6.59x^{-0.82} + 0.2 \quad (4)$$

式(4)中,x为压力值,N;y为电阻值,kΩ。

由于温度、湿度等环境因素会造成压力传感器的测量值发生漂移,清粪带边缘的禽粪可能会推动防跑偏器干扰判定,为提高系统工作的可靠性,减少误判,采用双阈值判定的方法,如图8所示。清粪带跑偏时越靠近滚筒其偏移量会越大,致使压力传感器N-1至N-3(N取1时为左侧压力传感器,取2时为右侧压力传感器)的值逐渐增大,依据这一原理进行双阈值判定。首先通过试验测出清粪带左偏或右偏

时其跑偏一侧3个压力传感器的数值,将此时压力传感器N-2和N-3的值作为跑偏阈值1和阈值2,小于阈值1为区间一,阈值1与阈值2之间为区间二,大于阈值2为区间三。当同侧的3个压力传感器的值均

落入区间一时,判定为清粪带处于正常运行状态,未向该侧跑偏(图8A);当传感器N-3的值大于阈值2,传感器N-2的值大于阈值1且大于传感器N-1的值时,判定清粪带向该侧跑偏(图8B-F)。



A:正常运行状态同侧压力值 The pressure on the same side of the normal operating state; B-F:跑偏状态同侧压力值 The pressure on the same side of the deviation state.

图8 双阈值判定

Fig.8 Double threshold determination

3) Fuzzy-PID控制器设计。在判定清粪带跑偏后,由STM32控制两侧步进电机运动使滑动拉板移动至指定位置,但由于在实际运行过程中存在步进脉冲被吃掉、传动误差等情况,因此引入Fuzzy-PID控制算法以提高稳定性和控制精度。Fuzzy-PID是以PID算法为基础,通过模糊规则实时在线整定PID参数,使其一直处于较好水平^[16-17]。Fuzzy-PID控制器由模糊化、模糊推理、解模糊三部分组成,最终得出比例系数 K_P 、积分系数 K_I 和微分系数 K_D 的在线修正值 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D ,其数学表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta u_k = K_P(e_k - e_{k-1}) + K_I e_k + K_D(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \\ K_P = K_{P_0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I_0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D_0} + \Delta K_D \end{array} \right. \quad (5)$$

式(5)中, Δu_k 为系统输出增量; e_k 、 e_{k-1} 、 e_{k-2} 分别为被控对象在 k 、 $k-1$ 、 $k-2$ 时刻的偏差值; K_{P_0} 、 K_{I_0} 、 K_{D_0} 为参数初始基值; ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 为 K_P 、 K_I 、 K_D 的在线修正值^[18]。

动态纠偏Fuzzy-PID控制系统见图9,采用二维模糊控制器,将滑动拉板期望位移与位移传感器反馈位移的偏差 e 和偏差变化率 de/dt 作为控制器的2个输入量, K_E 和 K_{EC} 分别为输入量 e 和 de/dt 的量化

因子,将 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 作为模糊控制器的输出。输入量 e 和 de/dt 的基本论域分别为 $[-30, 30]$ 、 $[-3, 3]$, 输出量 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的基本论域分别为 $[-15, 15]$ 、 $[-3, 3]$ 、 $[-0.6, 0.6]$, 输入、输出量的映射模糊论域均为 $[-3, 3]$ 。

将输入量和输出量的论域均划分出7个模糊子集,记为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB),各输入输出变量模糊子集均采用三角形隶属函数,输入变量 E 的隶属函数曲线如图10A所示, E_C 的隶属函数曲线如图10B所示,输出量 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的隶属函数曲线相同,如图10C所示。

根据经验制定如下控制规律,当偏差较大时,应取较大的 K_P 以加快响应速度,同时减小 K_I 和 K_D 以减小超调;当偏差为中等大小时, K_P 、 K_I 、 K_D 的取值应适中,以减小波动同时快速平稳到达目标值;当偏差较小时,应取较小的 K_P 、 K_D 和较大的 K_I ,使其能快速稳定在目标值附近,经模糊推理后采用最大隶属度法解模糊即可得到3个在线修正值 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 。

4)控制程序设计。STM32控制程序由6个模块组成,分别为主程序模块、压力值采集模块、电机驱动模块、Fuzzy-PID控制算法模块、反馈与异常中断

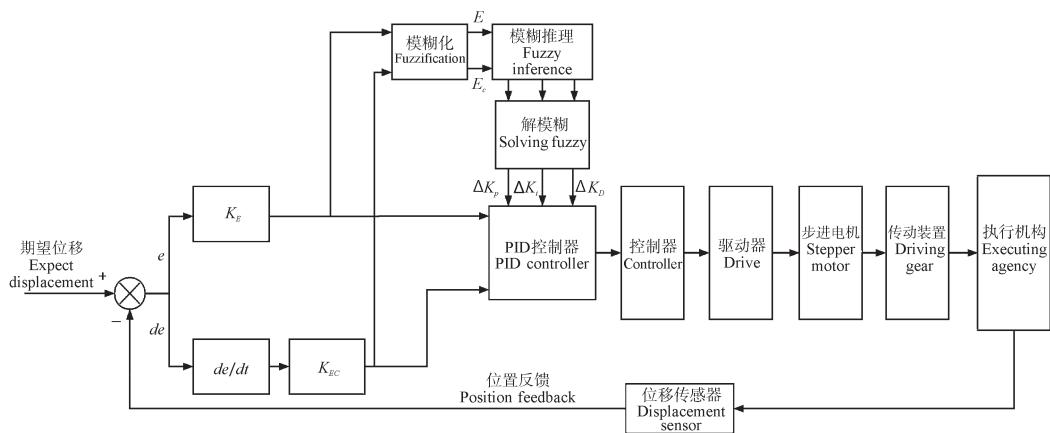
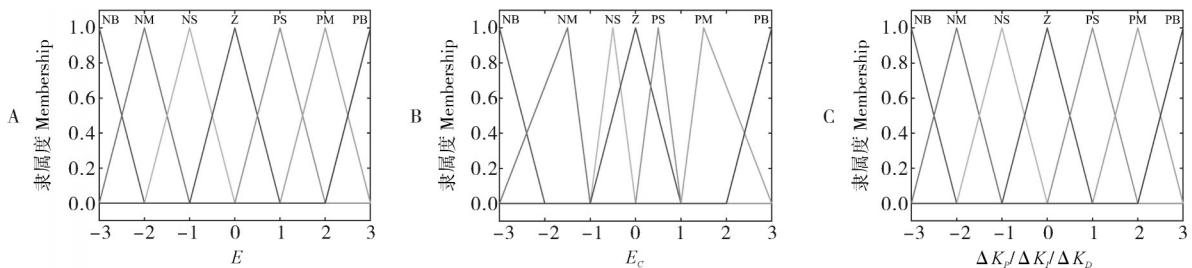


图9 动态纠偏Fuzzy-PID控制系统的框图

Fig.9 Block diagram of Fuzzy-PID control system for dynamic correction



A:隶属函数 E Membership function of E ; B:隶属函数 E_C Membership function of E_C ; C:隶属函数 $\Delta K_p/\Delta K_I/\Delta K_D$ Membership function of $\Delta K_p/\Delta K_I/\Delta K_D$.

图10 输入输出量隶属函数

Fig.10 Membership function of input and output quantity

模块和通信模块。主程序模块通过调用其他模块来分析数据并进行判断,统筹各模块完成动态纠偏。压力采集模块负责一层布置的6个压力传感器信号的采集,由ADC1的通道0至通道5共6个通道进行A/D转换,每个通道连续采样7次取中位数作为采样结果以提高可靠性,为减轻CPU的负载、提高计算速度,使用DMA控制器,使外设与存储器之间可直接进行数据传输。

电机驱动模块负责步进电机的控制,采用共阴极接法将TB6600驱动器EN-、DIR-、PUL-端口接地,将EN+、DIR+、PUL+作为控制端口,通过STM32产生的PWM波控制步进电机的运动,PWM控制端口的分配如表2所示。

Fuzzy-PID控制算法模块将控制算法的三部分(模糊化、模糊推理、解模糊)用程序实现,通过计算输入变量 E 和 E_C 中各模糊子集隶属函数表达式实现输入量的模糊化, ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 各建立一个 7×7 的规则库进行模糊推理,在经最大隶属度法解模糊后最终计算得出PWM波频率,同时将定时器设置为比较翻转模式 TIM_OCIInitStructure.TIM_OCMODE =

表2 步进电机PWM控制端口分配

Table 2 Stepper motor PWM control port allocation

电机编号 Motor No.	1号步进电机 Stepper motor No. 1	2号步进电机 Stepper motor No. 2
定时器及通道 Timer and channel	TIM3_CH3 (完全重映射 Complete remapping)	TIM4_CH1
PUL+脉冲端口 PUL+ pulse port	PC8	PB6
DIR+方向端口 DIR+ direction port	PE9	PC2
EN+使能端口 EN+ enable port	PE10	PC3

TIM_OCMODE_Toggle,实现步进电机转速的调节。

反馈与异常中断模块一是负责采集位移传感器的数据并将其传递给Fuzzy-PID控制器,二是配置外部中断函数,当接收到对射式光电传感器的异常情况信号时触发中断并接通蜂鸣器报警。

动态纠偏系统完整控制流程如图11所示,当开启自动控制后STM32采集各压力传感器的值进行A/D转换,得到6个压力值,将其分别与阈值1和阈值2进行比较,判定清粪带运行状态。若判定为跑

偏,则执行纠偏程序计算滑动拉板理论移动距离,开启 PWM 波驱动对应的电机执行纠偏,调用 Fuzzy-

PID 控制算法调节电机转速,在此期间,位移传感器反馈数据进行闭环控制。

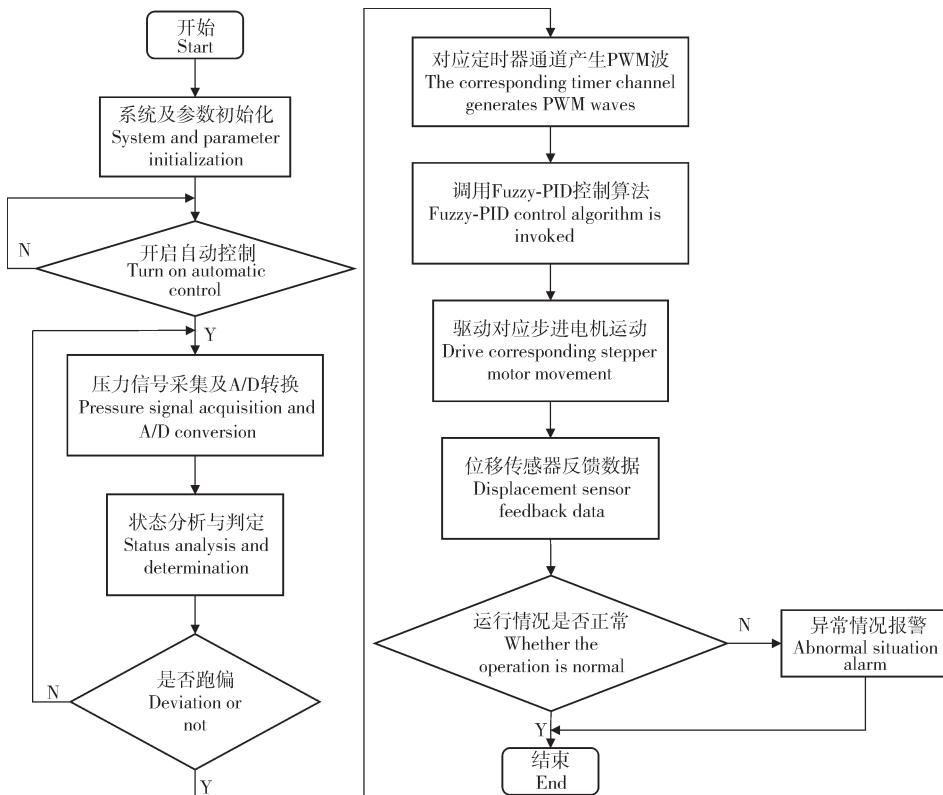


图 11 动态纠偏系统控制流程
Fig.11 Control flow of dynamic correction system

1.4 人机交互界面设计

为方便养殖人员查看该套系统的运行状态,基于 LabVIEW 开发了人机交互界面,相较于其他编程语言,LabVIEW 使用的是图形编程语言,具有门槛低、开发周期短等优点^[19],开发出的界面如图 12 所示。该人机交互界面分为压力监测和控制两个界面,压力监测界面主要由串口通信配置、接收发送区、压力数值显示、压力曲线显示 4 部分组成,通过串口通信配置并使用 Zigbee 无线串口收发模块在 PC 与 STM32 之间建立点对点无线通信,压力数字显示与曲线显示结合可以更直观得看到各压力值变化趋势。控制界面由模式选择、电机控制、压力阈值设定 3 部分组成,只有选择手动模式时才可以在该界面进行操作,每点击 1 次电机正转或反转按钮时对应电机根据指令转动 1 圈,阈值 1 设定和阈值 2 设定可用于修改双阈值判定的阈值 1 和阈值 2。

1.5 上机测试

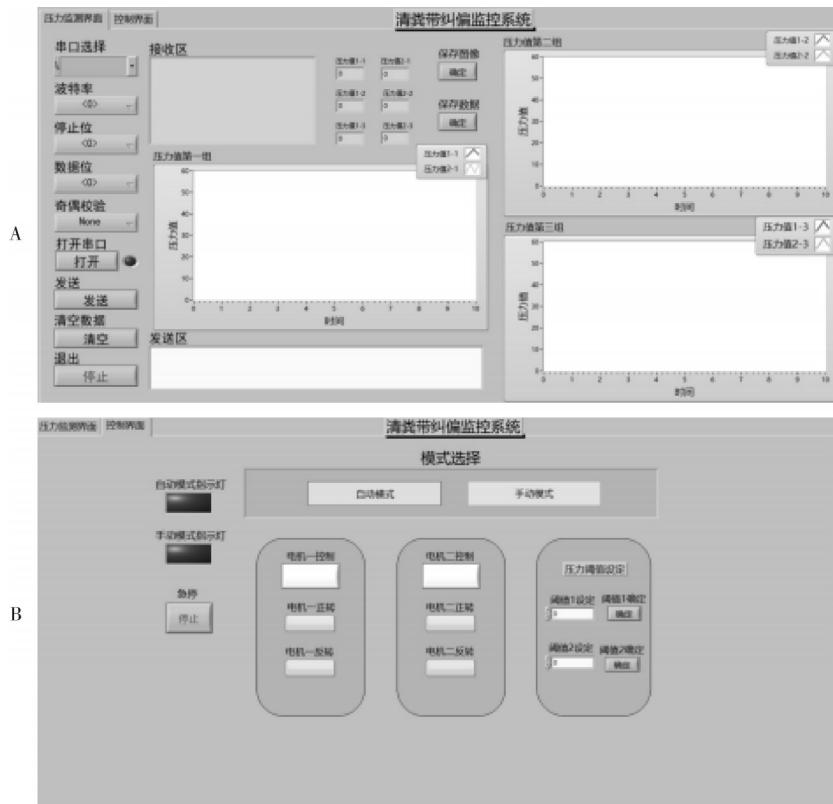
2023 年 6 月在湖北神丹健康食品有限公司下属福利蛋鸭养殖场进行了上机测试,清粪带宽度为 0.8 m,运行速度约为 0.08 m/s。为避免引起鸭的应

激反应,试验使用的是未养殖鸭舍内的空载清粪带,试验过程中向清粪带上浇洒少量水使其更贴近实际情况。试验前在层叠式笼养鸭的中间一层清粪设备上安装好该套纠偏装置,经调试各部分与控制系统能协调稳定运行。为获得压力阈值,在清粪带正常运行时,控制一侧纠偏执行装置中的步进电机正转,使滑动拉板后移,人为控制其跑偏,当清粪带侧边与侧边挡板摩擦接触时,认为清粪带已跑偏并需要纠偏处理,记录下此时跑偏一侧压力传感器 N-2 和 N-3 的值,重复该试验 10 次。

1.6 纠偏性能试验方法与评价

为进一步检验系统纠偏性能,在自动控制模式下进行纠偏试验,由于目前国内缺乏清粪带自动纠偏的相关评价技术指标,本次依据现场实际纠偏要求进行性能试验,试验现场见图 13。

清粪带两侧边缘与侧边挡板距离之和为 210 mm,因此,当清粪带左侧边缘与侧边挡板距离 $d' = 105$ mm 时,纠偏效果最佳。在每次试验完成后,测量清粪带左侧边缘至侧边挡板距离 d ,其值介于 70~140 mm 时视为纠偏成功,共进行了 20 次试验,试验



A:压力监测界面 Pressure monitoring interface; B:控制界面 Control interface.

图12 人机交互界面

Fig.12 Human-computer interaction interface

完成后计算距离 d 与最佳距离 d' 的平均相对偏差,计算公式为:

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i - d'|}{d'} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中, S 为平均相对偏差,%; n 为试验次数, $n = 20$; d_i 为第 i 次试验测量距离,mm; d' 为最佳距离, $d' = 105$ mm。

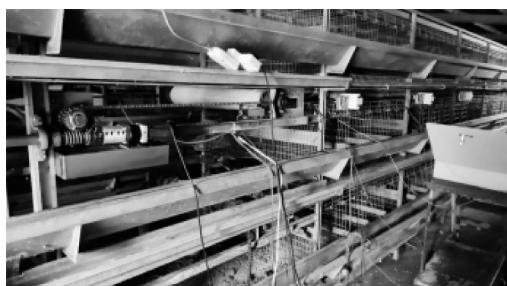


图13 纠偏性能试验现场

Fig.13 Correction performance test site

2 结果与分析

2.1 压力阈值与纠偏量测试结果

如图14所示,压力值N-2的最大值为11 N,平均

值为8.33 N,压力值N-3的最大值为14.3 N,平均值为13.25 N。基于上述试验数据,将阈值1设定为8.33 N,阈值2设定为13.25 N。

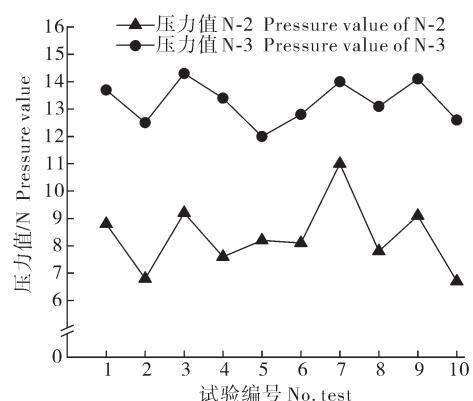


图14 压力阈值试验结果

Fig.14 Pressure threshold test results

根据以往人工纠偏经验,纠偏过程中一侧滑动拉板前移另一侧后移,移动距离为20~50 mm,故取纠偏量20、30、40、50 mm共4个水平进行试验。试验过程中在清粪带跑偏后手动控制跑偏一侧滑动拉板前移另一侧滑动拉板后移,移动距离相同均为纠偏量,随后启动清粪带运行,每个水平下左偏和右偏各

试验5次,记录下清粪带回归至正常状态所用时间,试验结果如表3所示,随着纠偏量的增加调节时间逐渐变短,纠偏量较小时调节时间较长且整体纠偏效果较差,纠偏量较大时调节时间较短但容易向另一侧跑偏,综合考虑取纠偏量为30 mm。

表3 纠偏量试验

Table 3 Deviation correction test

纠偏量/mm Deviation correction value	跑偏方向 Deviation direction	平均调节时间/s Average adjustment time	平均值/s Average value
20	左偏 Left deviation	50.3	52.2
	右偏 Right deviation	54.1	
30	左偏 Left deviation	37.2	36.1
	右偏 Right deviation	35.0	
40	左偏 Left deviation	25.7	26.4
	右偏 Right deviation	27.1	
50	左偏 Left deviation	18.5	17.5
	右偏 Right deviation	16.6	

2.2 纠偏性能试验

如图15所示,20次试验中有17次清粪带左侧边缘与侧边挡板距离介于70~140 mm,纠偏成功率率为85%。测量距离的最大值为147 mm,可得最大偏差值为42 mm,平均偏差值17 mm,平均相对偏差 $S=16\%$,试验结果中部分测量距离值相差较大,这是由于运行过程中带传动复杂的动态特性所导致的。

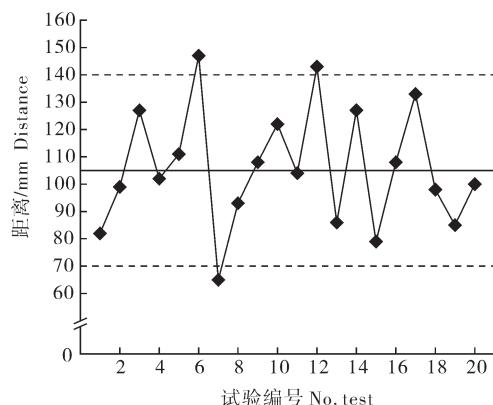


图15 纠偏试验测试结果

Fig.15 Correction experimental test results

3 讨 论

本研究针对笼养鸭养殖过程中出现的清粪带跑偏问题,设计了1套动态纠偏系统,包括跑偏检测装置、纠偏执行装置、控制系统、人机交互界面等,结合了Fuzzy-PID控制算法、传感技术、测试技术、计算机技术,实现了清粪带运行状态的实时监测和自动纠偏。在跑偏检测装置研究上,王东亮^[20]设计了基于倾角传感器的跑偏检测装置,通过布置在皮带两侧的一对检测装置计算偏移量,刘文平^[21]设计了四杆运动机构检测跑偏,将输送带的偏移量转换为距离传感器位置变化量,二者均依赖于较稳定检测条件,而本研究则是在每侧布置3个传感器,采用双阈值判定,提高了检测的抗干扰能力,且相较于其他纠偏方案,本研究设计的纠偏系统安装方便、成本低。性能试验结果表明整体纠偏成功率为85%,最大偏差值42 mm,平均偏差值17 mm,平均相对偏差为16%,基本满足养殖场对自动化纠偏的要求。

本研究设计的动态纠偏系统对提高笼养鸭养殖设备的自动化水平具有重要的现实意义,可以极大地减轻养殖人员的劳动强度,延长清粪带使用寿命,降低养殖成本,具有一定推广应用前景。但从试验结果可以看出该套纠偏系统性能还有很大的提升空间,后续可以在传感器布置、控制算法优化等方面再进行改进。

参考文献 References

- [1] 陈斌丹,张科杰,李柳萌,等.蛋鸭笼养现状与发展趋势[J].浙江农业科学,2022,63(8):1868-1870.CHEN B D, ZHANG K J, LI L M, et al. Present status and development trend of egg duck cage rearing[J]. Journal of Zhejiang agricultural sciences, 2022, 63(8): 1868-1870 (in Chinese).
- [2] 王树才,王玉泉,李振强.提高鸭蛋清洁度的层叠式笼养蛋鸭笼底网的优化设计[J].农业工程学报,2019,35(4):211-217. WANG S C, WANG Y Q, LI Z Q. Optimization design of bottom wire mesh used in cascading cage-rearing laying duck for improving duck egg cleanliness [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35 (4): 211-217 (in Chinese with English abstract).
- [3] 程定文.蛋鸭笼养技术的开发利用与发展前景[J].现代农业科技,2017(10):234-235.CHENG D W. Development, utilization and development of egg-duck caging technology [J]. Modern agriculture science and technology, 2017 (10): 234-235 (in Chinese).
- [4] 王玉泉.蛋鸭层叠笼养设备及控制系统的设计与研究[D].武

- 汉:华中农业大学,2020.WANG Y Q.Design and research of cascading cage-rearing equipment and control system for laying duck[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English Abstract).
- [5] 吴晓明.煤矿皮带机跑偏机理与防护措施[J].能源与节能,2022(1):215-216.WU X M.Mechanism and protective measures of belt conveyor deviation in coal mines[J]. Energy and conservation, 2022(1): 215-216 (in Chinese with English abstract).
- [6] 郭雨,周新飞.传动滚筒的形状对传送带跑偏的影响[J].山东工业技术,2017(11):16.GUO Y, ZHOU X F.The influence of the shape of the transmission drum on the deviation of the conveyor belt [J]. Shandong industrial technology, 2017 (11):16(in Chinese).
- [7] 陈计远,段恩泽,方鹏,等.带式清粪机胶带跑偏监测装置研究[J].中国养兔,2019(1):43-44.CHEN J Y, DUAN E Z, FANG P, et al.Research on the monitoring device of tape deviation in belt type manure cleaner[J].Chinese journal of rabbit farming, 2019(1):43-44(in Chinese).
- [8] 杨滨.矿用带式输送机跑偏机理及纠偏装置设计应用[J].机械工程与自动化,2022 (2): 203-204.YANG B. Deviation mechanism of mining belt conveyor and design and application of deviation correction device [J]. Mechanical engineering & automation, 2022 (2): 203-204 (in Chinese with English abstract).
- [9] 朱亮,李东波,吴崇友,等.基于数据挖掘的电子皮带秤皮带跑偏检测[J].农业工程学报,2017,33(1):102-109.ZHU L, LI D B, WU C Y, et al.Detection of belt deviation of belt weigher using data mining [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(1):102-109(in Chinese with English abstract).
- [10] 张仕林.聚四氟乙烯输送带跑偏机理研究[D].湘潭:湖南科技大学,2019.ZHANG S L.Research on deviation mechanism of PTFE conveyor belt [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019 (in Chinese with English Abstract).
- [11] 汪列文.基于故障树分析的输送带跑偏故障研究[D].秦皇岛:燕山大学,2019.WANG L W.Research on conveyor belt deviation fault based on fault tree analysis[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019(in Chinese with English Abstract).
- [12] YANG Y, MIAO C, LI X, et al. On-line conveyor belts inspection based on machine vision[J]. Optik, 2014, 125(19): 5803-5807.
- [13] ZHANG M, JIANG K, CAO Y, et al.A deep learning-based method for deviation status detection in intelligent conveyor belt system[J/OL].Journal of cleaner production, 2022,363: 132575 [2023-10-10]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132575>.
- [14] 尹兆明.基于多体动力学特性的输送带跑偏研究[D].青岛:青岛科技大学,2017.YIN Z M. Study on deviation of conveyor belt based on multi-body dynamics characteristics[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2017(in Chinese with English Abstract).
- [15] 任玲,王宁,曹卫彬,等.番茄钵苗整排取苗手定位的模糊PID控制[J].农业工程学报,2020,36(8):21-30.REN L, WANG N, CAO W B, et al.Fuzzy PID control of manipulator positioning for taking the whole row seedlings of tomato plug seedlings[J].Transactions of the CSAE, 2020,36(8):21-30(in Chinese with English abstract).
- [16] 熊成成,周德强,邓干然,等.振动链式木薯收获机挖掘深度自动控制系统设计与测试[J].华中农业大学学报,2022,41(2):217-226.XIONG C C, ZHOU D Q, DENG G R, et al.Design and test of automatic control system for excavation depth of vibrating chain cassava harvester[J].Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(2): 217-226 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘伟健,罗锡文,曾山,等.基于模糊PID控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J].农业工程学报,2022,38(10): 1-9.LIU W J, LUO X W, ZENG S, et al. Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 1-9(in Chinese with English abstract).
- [18] 王侨,曹卫彬,张振国,等.穴盘苗自动取苗机构的自适应模糊PID定位控制[J].农业工程学报,2013(12): 32-39.WANG Q, CAO W B, ZHANG Z G, et al.Location control of automatic pick-up plug seedlings mechanism based on adaptive fuzzy-PID [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 32-39(in Chinese with English abstract).
- [19] 林静,林振宇,郑福仁. LabVIEW 虚拟仪器程序设计从入门到精通[M].北京:人民邮电出版社,2010.LIN J, LIN Z Y, ZHENG F R.LabVIEW virtual instrument programming from beginner to master [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2010(in Chinese).
- [20] 王东亮.带式输送机主动纠偏系统研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.WANG D L.Research on active deviation correction system of belt conveyor[D].Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021 (in Chinese with English Abstract).
- [21] 刘文平.基于模糊控制的带式输送机纠偏装置的设计与研究[D].太原:太原理工大学,2015.LIU W P.The design and research of the deviation correcting device for belt conveyor based on fuzzy control [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015(in Chinese with English Abstract).

Design of dynamic correction system for manure cleaning belt of stacked cage-farming duck

ZHENG Wei¹, GONG Dongjun^{1,2}, ZHOU Jianwei¹, HOU Shuaikai¹,
HUANG Kaihu¹, WANG Shucui¹, LI Ling³

1. College of Engineering /Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Wuhan Vocational College of Software and Engineering (Wuhan Open University), Wuhan 430205, China;

3. Hubei Shendan Healthy Food Co., Ltd, Anlu 432600, China

Abstract A dynamic correction system consisted of a deviation detection device, a correction execution device, a control system, etc. for the manure cleaning belt was designed to solve the deviation of the manure cleaning belt during the farming of duck with stacked cage. Firstly, the operation status of the manure cleaning belt was monitored in real-time through 6 pressure sensors arranged on both sides of the belt. When the manure cleaning belt deviated, its side pushed the anti-deviation device in the deviation detection device, causing the values of the 3 pressure sensors on the deviated side to change. The direction and offset amount of the cleaning belt was indirectly inferred through the changes. When the STM32 microcontroller determined the deviation of the manure cleaning belt based on the data collected from sensors, it automatically controlled the movement of the stepper motors on both sides, thereby adjusting the forward and backward movement of the drum along the sliding rail to achieve correction. At the same time, the Fuzzy PID control algorithm was introduced to achieve closed-loop control through feedback from displacement sensors to improve the stability and control accuracy of the control system. The results showed that the overall success rate of correction was 85%, with an average deviation of 17 mm and an average relative deviation of 16%. It is indicated that the dynamic correction system designed for the manure cleaning belt basically meets the requirements of the stacked cage-farming duck for automatic correction of the manure cleaning belt, greatly reducing the labor intensity of the farming personnel.

Keywords manure cleaning belt; correction; automatic adjustment; fuzzy control; pressure sensor; cage-farming duck

(责任编辑:赵琳琳)