

冷鲜鸭胴体自动开膛装置设计与试验分析

王玉豪¹ 柏宗春^{2,3,4} 赵世达⁵ 刘云平¹ 郑 好¹

(1. 安徽科技学院智能制造学院, 安徽 滁州 233100; 2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏 南京 210014; 3. 农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室, 江苏 南京 210014; 4. 江苏省设施水禽健康养殖装备工程研究中心, 江苏 南京 210014; 5. 河北省农林科学研究院农业信息与经济研究所, 河北 石家庄 050031)

摘要: [目的] 针对现行肉鸭屠宰分割加工工艺开膛环节自动化水平低、劳动强度大等问题。[方法] 以冷鲜鸭胴体为研究对象, 模拟现有人工开膛方式, 创制冷鲜鸭胴体自动开膛装置。设计专用开膛刀具, 利用数学分析法对刀具开膛动作进行运动分析与空间曲线拟合, 得出特性方程并分析鸭胴体开膛刀具设计的合理性。另外, 结合 STM32 单片机与信号处理模块确立控制逻辑, 并开发控制系统。引入鸭胴体开膛误差率指标, 以刀具转速、挂链牵引速度和鸭胴体质量作为因素, 划分三水平, 设计正交试验, 进行冷鲜鸭胴体自动开膛装置参数寻优, 并阐明各因素对开膛误差率的影响规律。[结果] 所提冷鲜鸭胴体自动开膛装置在刀具转速 10 r/min, 挂链牵引速度 0.086 m/s 的条件下, 对质量 2.3~2.6 kg 的冷鲜鸭胴体开膛效果最优, 开膛误差率最低, 为 3.29%。[结论] 所提冷鲜鸭胴体自动开膛装置能够实现鸭胴体正确限位及自动化开膛作业。

关键词: 冷鲜鸭; 胴体开膛; 自动开膛装置; 专用刀具; 运动分析

Design and test analysis of automatic disemboweling device for chilled fresh duck carcasses

WANG Yuhao¹ BAI Zongchun^{2,3,4} ZHAO Shida⁵ LIU Yunping¹ ZHENG Hao¹

(1. College of Intelligent Manufacturing, Anhui Science and Technology University, Chuzhou, Anhui 233100, China; 2. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu 210014, China; 3. Key Laboratory of Protected Agriculture Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing, Jiangsu 210014, China; 4. Jiangsu Engineering Research Center for Healthy Breeding Equipment of Facility Waterfowl, Nanjing, Jiangsu 210014, China; 5. Institute of Agricultural Information and Economics, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: [Objective] To solve the problems of low automation level and high labor intensity in the disemboweling process of the current meat duck slaughtering and processing technology. [Methods] With chilled fresh duck carcasses as the research object, an automatic disemboweling device for chilled fresh duck carcasses was created by simulating the existing manual disemboweling method. A special disemboweling tool was designed. Mathematical analysis was used to conduct motion analysis and spatial curve fitting of the disemboweling action of the tool, so as to obtain the characteristic equation and analyze the rationality of the design of the duck carcass disemboweling tool. In addition, the control logic was established by combining an STM32 microcontroller and a signal processing module, and the control system was developed. The duck carcass disemboweling error rate was introduced as an index. Tool rotation speed, hanging chain traction speed, and duck carcass mass were selected as factors with three levels each. An orthogonal test was designed to optimize the

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金(编号: CX(23)1022); 江苏省现代农机装备与技术推广项目(编号: NJ2024-08); 河北省农林科学院科技创新专项(编号: 2025KJCXX-XXXX-2)

通信作者: 柏宗春(1981—), 男, 江苏省农业科学院研究员, 博士。E-mail: vipmaple@126.com

收稿日期: 2025-06-11 **改回日期:** 2026-04-24

引用格式: 王玉豪, 柏宗春, 赵世达, 等. 冷鲜鸭胴体自动开膛装置设计与试验分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 107-113.

Citation: WANG Yuhao, BAI Zongchun, ZHAO Shida, et al. Design and test analysis of automatic disemboweling device for chilled fresh duck carcasses[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 107-113.

parameters of the automatic disemboweling device for chilled fresh duck carcasses, and the influence laws of each factor on the disemboweling error rate were clarified. [Results] The proposed automatic disemboweling device for chilled fresh duck carcasses achieves the optimal disemboweling effect and the lowest disemboweling error rate of 3.29% for chilled fresh duck carcasses with a mass of 2.3~2.6 kg under the conditions of a disemboweling tool rotation speed of 10 r/min and a hanging chain traction speed of 0.086 m/s. [Conclusion] The proposed automatic disemboweling device for chilled fresh duck carcasses can realize the correct limitation and automatic disemboweling operation of duck carcasses.

Keywords: chilled fresh duck; carcass disemboweling; automatic disemboweling device; special tool; motion analysis

鸭肉作为中国居民日常膳食结构中的重要组成部分,食用比重占禽肉 1/3,且人均消费量逐年增加,市场需求进一步扩大。据统计,2024 年中国人均鸭肉消费量为 6.20 kg/人,同比增长 10.60%,鸭肉稳产保供对肉类市场平稳发展具有重要意义^[1]。鸭肉产品上市前,通常依据行业分割标准和大众喜好,将鸭胴体关键部位分割为诸如鸭翅、鸭腿、鸭脖等相应的多类分体,是鸭肉产品增值的重要环节。其中,鸭肝、肠等内脏作为休闲风味食品的原材料,由冷鲜鸭胴体经开膛得到,但目前中国肉鸭屠宰加工企业在该环节普遍采用人工辅助流水线作业的形式完成,存在生产效率低、作业环境恶劣、易交叉感染等问题,制约着产能的提升,产业发展亟待冷鲜鸭胴体自动开膛装置的创新提出。

近年来,诸多国内外学者围绕畜禽胴体自动化分割加工,基于机械设计、自动控制与人工智能技术展开探索,展现出一系列成果案例。张海波等^[2]设计了一种内置切割电机的圆槽套机构,解决了对家禽进行开膛时易出现切口跑偏的问题,保证了开膛口的一致性。汪阅等^[3]设计了一种家禽分割用自动开膛装置,刀具采用圆盘刀锯开膛的方式降低人员劳动强度、结构及制造简单、作业流畅、开膛效果好、使用寿命长。蒋俊强等^[4]设计了一种剪切式开膛机械手,通过试验说明一定范围内的速度变化和开膛位置变化对切口长度和位置的影响较小,具有一定的适用范围,开膛效果可以满足要求。涂本帅^[5]设计了猪胴体智能开膛机器人系统,采用六自由度机械臂,搭配圆盘刀具,通过视觉识别定位开膛位置的方法来进行开膛作业,试验能够顺利完成开膛且不损伤内脏。李振强等^[6]为了实现羊骨架自动化加工,提出了一种基于机器视觉和机器学习技术的羊骨架自动分割方法,提取羊骨架 4 个部位的特征点,对比不同的预测模型且优选出最佳模型,搭建分割试验平台表明方法可行且效率显著提升,进行的 3 组试验,平均偏移距离为 3.45 mm。Xu 等^[7]概述了肉类行业中从畜牧业、家禽业和渔业切割机器人化的当前研究及商业应用,强调了智能传感技术、先进切割技术,旨在推动切割机器人化。以上成果虽在一定程度上补齐了行业短板,但对小体尺肉鸭屠宰分割加工的适用性有待验证,肉鸭自动开膛专用装置尚为空白。

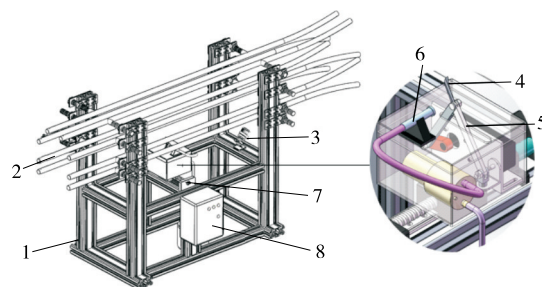
研究拟参照肉鸭现行屠宰加工生产线物料输送方

式,基于连杆特性设计开膛刀具,结合自动控制,引入清洗消毒,集成创制冷鲜鸭胴体自动开膛装置,并通过正交试验优化冷鲜鸭胴体自动开膛装置工作参数,同时验证其性能,旨在为肉鸭开膛环节的自动化提升提供关键技术与装备支撑。

1 冷鲜鸭胴体自动开膛装置整体设计

1.1 冷鲜鸭胴体自动开膛装置总体结构

冷鲜鸭胴体自动开膛装置涉及鸭胴体正挂姿态胁迫、定向传输、自动开膛、刀具清洗消毒功能,主要由机架、限位导轨、传感器模块、开膛刀具、四杆机构、消毒装置、升降装置、控制柜等组成。其中,限位导轨完成鸭胴体正挂姿态胁迫和定向传输,开膛刀具结合连杆机构对鸭胴体进行自动开膛,消毒装置实现对开膛刀具的清洗消毒,冷鲜鸭胴体自动开膛装置总体结构如图 1 所示。



1. 机架 2. 限位导轨 3. 传感器模块 4. 开膛刀具 5. 四杆机构 6. 消毒装置 7. 升降装置 8. 控制柜

图 1 冷鲜鸭胴体自动开膛装置总体结构图

Figure 1 Overall structure diagram of automatic disemboweling device for chilled fresh duck carcasses

1.2 冷鲜鸭胴体自动开膛装置工作原理

冷鲜鸭胴体开膛前序工位为脱毛和预冷^[8],之后进行开膛作业,包括限位、开膛、消毒等步骤。具体流程:以肉鸭屠宰加工业专用挂链为传输机构,带动鸭胴体沿水平方向匀速传输至开膛装置,该过程中,鸭胴体经过限位导轨引导限位,改变形体为四肢舒展同时腹部向下姿态,并保持前进趋势。当鸭胴体运动至既定位置时,触发光电传感器信号并启动电机,随后电机带动并联开膛刀具的连杆机构进行开膛作业,使开膛刀具沿水平方向运动且

与鸭胴体前进方向相反,进而形成相对的切割力。通过挂链的牵引与开膛刀具的配合实现鸭胴体开膛,并带待已开膛的鸭胴体脱离工作区后开膛刀具停止工作。最终,消毒装置启动对开膛刀具进行消毒,完成开膛作业。冷鲜鸭胴体自动开膛工作流程如图2所示。

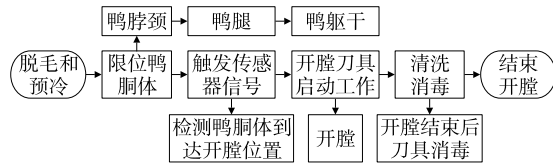


图2 冷鲜鸭胴体自动开膛过程流程图

Figure 2 Flow chart of automatic disemboweling process for chilled fresh duck carcasses

2 关键部件设计

2.1 冷鲜鸭胴体限位机构设计

冷鲜鸭胴体开膛前需固定姿态,从而确保其腹部完整裸露,且四肢相对静止无干涉,便于后续开膛作业。针对该需求,利用8根直径与厚度分别为16,3 mm的304食品级不锈钢管立体等距交错布置,从而对鸭胴体进行空间限位,如图3所示。其中,A组导轨对鸭脖颈进行限位,使其能够沿直线运动,B/C组导轨对躯干部位进行限位,并施加横向载荷使其约束,防止偏移。C/D组导轨对鸭腿进行限位,分别位于鸭腿靠近躯干一侧和靠近尾部一侧,D组导轨对鸭腹部有支撑力,确保腹部裸露。限位导轨综合鸭躯干、腿部限位,避免为后续开膛动作造成干扰。通过上述限位导轨对鸭胴体空间姿态的约束,使鸭胴体的开膛部位尽可能平整、裸露和限位,进而创造理想的作业条件。

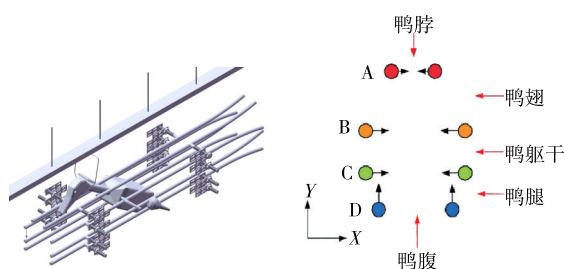


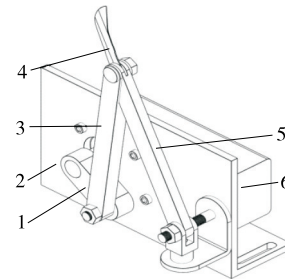
图3 限位机构结构图

Figure 3 Structure diagram of limit mechanism

2.2 冷鲜鸭胴体开膛刀具设计与运动分析

2.2.1 冷鲜鸭胴体开膛刀具设计 在冷鲜鸭胴体开膛装置中,刀具设计及运动分析是开膛装置的核心^[9]。四杆机构由于具有结构简单、运动平滑、便于调节等特点^[10],其间歇运动满足了开膛作业需求,因此,结合冷鲜鸭胴体开

膛作业高效、精准、切割可调的行业需求,设计冷鲜鸭胴体开膛刀具,其结构如图4所示。



1. 驱动杆 2. 底座支架 3. 连杆 4. 开膛刀具 5. 摇杆 6. 电机

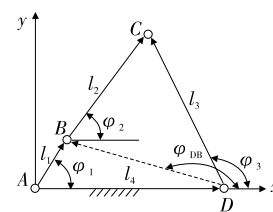
图4 冷鲜鸭胴体自动开膛刀具结构图

Figure 4 Structure diagram of automatic disemboweling tool for chilled fresh duck carcasses

冷鲜鸭胴体自动开膛刀具由电机、驱动杆、连杆、摇杆、刀具、底座支架等组成。其中,驱动杆由电机施加动力,带动摇杆作空间曲线往复运动,摇杆顶部安装开膛刀具,该刀具常用于生物体解剖,具有锋利、侵入阻力小,耐磨、成本低等特性,在四杆机构空间限位下,实现鸭腹部的有效剖开。

2.2.2 冷鲜鸭胴体自动开膛刀具运动分析 冷鲜鸭胴体自动开膛刀具主要依赖联动电机的四杆机构进行驱动,同时,通过四杆机构的连杆、摇杆的尺寸调整和运动配合进行空间切割轨迹拟合,四杆机构的运动规律与刀具切割轨迹优劣对开膛作业成果与否存在直接相关关系,因此,对冷鲜鸭胴体自动开膛刀具的空间运动规律展开运动分析。

将连杆机构进行简化,如图5所示。



AB. 驱动杆 BC. 连杆 CD. 摇杆 AD. 机架

图5 开膛刀具运动机构简图

Figure 5 Schematic diagram of movement mechanism of disemboweling tool

根据刚体平面运动的矢量合成原理,在封闭的矢量多边形ABCD中,各杆的位移矢量满足如式(1)所示。

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{l}_3 + \vec{l}_4, \quad (1)$$

式中:

$\vec{l}_1$ ——驱动杆AB位移矢量,mm;

$\vec{l}_2$ ——连杆BC位移矢量,mm;

$\vec{l}_3$ ——摇杆 DC 位移矢量, mm;

$\vec{l}_4$ ——机架 AD 位移矢量, mm。

参照文献[11]中对铰链四杆机构的运动分析知, 各参数的关系展开式和求解公式:

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 = l_4 + \cos \varphi_3 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 = l_3 \sin \varphi_3 \end{cases}, \quad (2)$$

角位移 φ :

$$\begin{cases} \varphi_2 = \pm \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_{BD}^2 - l_3^2}{2l_2 l_{BD}}\right) - (180^\circ - \varphi_{BD}) \\ \varphi_3 = \varphi_{BD} \mp \arccos\left(\frac{l_3^2 + l_{BD}^2 - l_2^2}{2l_3 l_{BD}}\right) \end{cases}, \quad (3)$$

角速度 ω :

$$\begin{cases} \omega_2 = \frac{-\omega_1 l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \\ \omega_3 = \frac{\omega_1 l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)} \end{cases}, \quad (4)$$

角加速度 ϵ :

$$\epsilon_3 = \omega_1^2 \frac{l_1}{l_2} \left[\frac{l_1 \sin^2(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \sin^3(\varphi_3 - \varphi_2)} + \frac{\cos(\varphi_1 - \varphi_2)}{\sin(\varphi_3 - \varphi_2)} - \frac{l_1 \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_3 \sin^2(\varphi_3 - \varphi_2)} \cot(\varphi_3 - \varphi_2) + \frac{\epsilon_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{\omega_1^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)} \right], \quad (5)$$

式中:

l_1 ——驱动杆 AB 的长度, mm;

l_2 ——连杆 BC 的长度, mm;

l_3 ——摇杆 DC 的长度, mm;

l_4 ——机架 AD 的长度, mm;

l_{BD} ——点 B 到 D 连线的长度, mm;

φ_1 ——驱动杆 AB 与机架 AD 的夹角, $^\circ$;

φ_2 ——连杆 BC 与机架 AD 的夹角, $^\circ$;

φ_3 ——摇杆 CD 与机架 AD 的夹角, $^\circ$;

φ_{BD} ——BD 连线与机架 AD 的夹角, $^\circ$;

ω_1 ——驱动杆 AB 的角速度, $(^\circ)/s$;

ω_2 ——连杆 BC 的角速度, $(^\circ)/s$;

ω_3 ——摇杆 CD 的角速度, $(^\circ)/s$;

ϵ_1 ——驱动杆 AB 的角加速度, $(^\circ)/s^2$;

ϵ_3 ——摇杆 CD 的角加速度, $(^\circ)/s^2$ 。

角加速度 ϵ_3 的正负号表示角速度的变化趋势, ϵ 与 ω 同号表示加速转动, 异号表示减速转动。由于开膛刀具安装于摇杆, 故仅对 l_3 进行运动分析。在所设计的四杆机构中, 经实际测量鸭胴体主要体形参数以及电机安装的空间位置尺寸, 各杆的设计尺寸在一定范围内选取, 同时, 为了计算简便, 选取各杆参数为 $l_1=20$ mm、 $l_2=76$ mm、 $l_3=72$ mm、 $l_4=58$ mm、 $\omega_1=180$ $(^\circ)/s$, 两个极位夹角之间为刀具切入鸭胴体区间, 在第一个极位夹角时, 刀具处于初始位置, φ_1 为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 时, 代入式(3)~式(5)中, 计算出相应值并绘制出相应的曲线, 如图 6 所示。

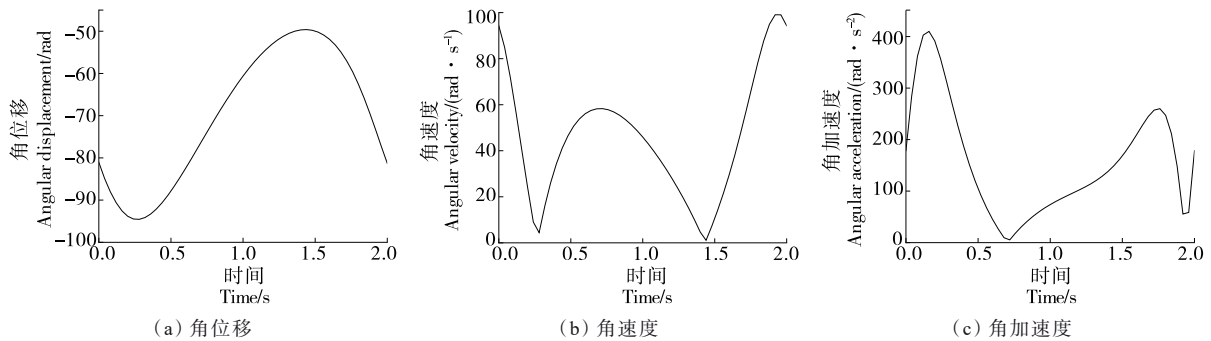


图 6 开膛刀具运动数学分析特性曲线

Figure 6 Characteristic curves of mathematical analysis on motion of disemboweling tool

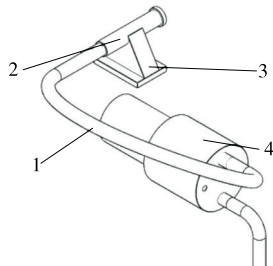
由于鸭腹部脂肪厚度范围分布在 3~7 mm, 冷鲜鸭胴体开膛要求刀具空间运动 Y 方向不宜突变, 且位移差不能过大, 同时速度变化宜平稳。通过数学分析法对开膛刀具进行运动分析, 得出了开膛刀具运动的数学分析特性曲线。图 6(a) 中 2 个拐点表明, 开膛刀具处于两个极位夹角之间工作时的角位移变化幅度小, 拐点变化平稳; 图 6(b) 中 2 个极小值表明, 开膛刀具处于两个极位夹角之间工作时的角速度变化连续且平稳, 且该区间在第一个极小值时刀具是切入鸭胴体状态, 数值不接近于“0”, 不会造成“爬行”现象, 且极大值不高, 输出过程运动相对平

稳; 图 6(c) 加速度变化表明, 开膛刀具在工作时的角加速度小, 回程结束时角加速度大, 具有“急回特性”符合工作状态, 且曲线未出现“峰点”, 曲线变化率平缓, 同时, 该相应时间段有一定的对称性, 具有一定的合理性。

通过以上分析表明, 刀具运动的特性与各杆的长度和曲柄的初始位置有关, 刀具开膛的角度和速度与曲柄长度、连杆长度、摇杆长度、方位角大小有关, 冷鲜鸭胴体自动开膛刀具空间运动曲线设计合理、符合实际开膛需要。

2.3 开膛刀具消毒装置设计

开膛刀具的消毒是畜禽屠宰分割和产品加工中至关重要的一个环节,直接关系到最终食品安全、品质和保质期。冷鲜鸭胴体自动开膛消毒装置设计主要由消毒水管、喷头、喷头底座和水泵组成(见图7),其结构的相关参数是依据开膛装置的空间参数确立。



1. 消毒水管 2. 喷头 3. 喷头底座 4. 水泵

图7 自动开膛刀具消毒装置结构图

Figure 7 Structure diagram of sterilization device for automatic disemboweling tool

开膛刀具消毒作业工作原理为根据对开膛刀具的消毒需求,如“一刀一消毒”“多刀一消毒”等设定程序,由前端检测的传感器信号作为触发条件,传导至控制单元控制水泵的启停,实现消毒剂由吸入口到喷出口的工作过程,使得安装在开膛刀具处的喷头喷出消毒剂从而完成对开膛刀具的消毒。

3 冷鲜鸭胴体自动开膛控制系统

冷鲜鸭胴体自动开膛装置作业环节主要包括运输、开膛、清洗等,选用运算速度快、抗干扰能力强、开发资源丰富和价格低廉的STM32F103C8T6单片机作为开发板设计控制系统^[12],电路控制系统方框如图8所示。

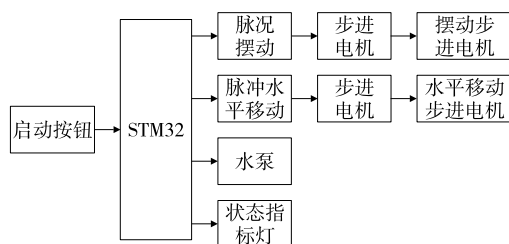


图8 STM32控制系统方框图

Figure 8 Block diagram of STM32 control system

开膛刀具初始位置处于鸭胴体限位后的下方,开膛部位方向正对开膛刀具方向,按下启动按钮后,限位后的鸭胴体向前运动,被传感器检测到,启动开膛刀具电机进行开膛。该动作过程中,摆动步进电机驱动四杆机构带动刀具前后摆动,并利用STM32F103C8T6开发板的GPIOA口与DM542驱动器PUL、DIR接口分别控制电机

的转速和方向,用以调节开膛刀具的角速度和摆动方向。

另外,水平移动步进电机驱动牵引挂链鸭胴体水平方向移动,同样利用GPIOA口与DM542驱动器PUL、DIR接口调节鸭胴体的移动速度和距离。

在开膛动作完成之后,直流电机触发,水泵针对刀具进行消毒作业,控制策略为STM32F103C8T6开发板的GPIOB口与TB6612FNG驱动模块AO口连接,输出端AIN和BIN连接控制直流电机的启停。

4 冷鲜鸭胴体自动开膛试验

笼养肉鸭通常37~40 d出栏,之后分批次进行屠宰分割^[13],由于不同批次鸭胴体存在体尺和体质量差异,需要基于鸭胴体体型参数调整冷鲜鸭胴体自动开膛装置的性能。因此,通过引入不同的刀具转速、挂链牵引速度和鸭胴体质量的参数组合,设计三因素三水平试验进行寻优,以优选开膛效果的参数组合以及验证冷鲜鸭胴体开膛装置设计的合理性。

4.1 材料及方法

试验材料选用未开膛的冷鲜樱桃谷鸭白条27只,体质量1.8~3.0 kg,对设计的冷鲜鸭胴体自动开膛装置进行参数试验。通过STM32F103C8T6单片机控制传感器、驱动器来调整不同的参数,设计9组试验,每组试验重复3次取误差率平均值^[14]。

为得到冷鲜鸭胴体自动开膛装置最佳作业参数,依据四杆机构的设计分析和相似特性曲线,同时,结合实际开膛工况,选取刀具转速低于30 r/min以及对应匹配的挂链牵引速度和鸭胴体质量作为实际开膛的参数的因素水平,基于此设计三因素三水平的正交试验,因素及编码水平如表1所示。

表1 因素和水平编码表

水平	A 刀具转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	B 挂链牵引速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	C 鸭胴体质量/kg
1	15	0.100	1.8~2.2
2	10	0.086	2.2~2.6
3	5	0.075	2.6~3.0

4.2 评价指标

冷鲜鸭胴体开膛作业是肉鸭现行加工工艺中的一项关键环节,一般位于浸蜡脱毛之后,掏膛之前,目的在于为后续的去脏作业创造便利条件。目前,在行业技术标准体系,未对冷鲜鸭胴体的开膛误差情况评价进行描述。为分析评价所提冷鲜鸭胴体自动开膛装置的作业性能,经产业调研与实际生产作业情况设立开膛误差率作为所提冷鲜鸭胴体自动开膛装置主要的性能评价指标。确立膛口长度100 mm、膛线偏移量0以及膛口深度

适中,即开透皮脂且不伤及内脏的情况为主要评判开膛质量的标准参数,再根据各参数对开膛质量的影响重要程度不同设计开膛误差率作为开膛合格率的评价指标。开膛误差率是通过计算实际开膛线与理想开膛线的综合误差获得,旨在反映鸭胴体开膛的不合格程度,各开膛线在鸭胴体腹部具体位置如图 9 所示。

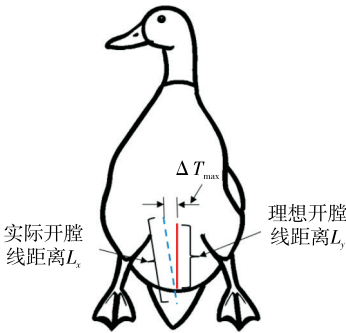


图 9 冷鲜鸭胴体开膛位置示意图

Figure 9 Schematic diagram of disemboweling position for chilled fresh duck carcasses

开膛误差率指标计算:

$$Q=(0.15L+0.35T+0.5H)\times 100\%,\tag{6}$$

$$L=|L_x-L_y|,\tag{7}$$

$$T=\Delta T_{\max},\tag{8}$$

式中:

Q ——开膛误差率,%;

L ——实际开膛线与理想开膛线长度差值,mm;

T ——实际膛线位置与理想膛线位置偏移距离,mm;

H ——与开膛深度相关的损伤系数;

L_x ——实际膛线长度,mm;

L_y ——理想膛线长度,mm;

$\Delta T_{\max}$ ——实际膛线位置与理想膛线位置的最大偏移距离,mm。

在式(6)中,与开膛深度相关的损伤系数 H 的取值分别为 85,15,0,其中,85 代表膛口深度过深、损伤内脏,15 为膛口深度适中,切透脂肪,但未损伤内脏,0 表征完整开膛。

鸭胴体开膛合格率可由式(9)计算获得。

$$P=1-Q,\tag{9}$$

式中:

P ——开膛合格率,%。

4.3 结果与分析

按照表 1 中确定的因素水平开展冷鲜鸭胴体开膛试验,结果如表 2 和图 11 所示。

由表 2~表 3 可知,开膛误差率影响程度最大的为刀具转速,挂链牵引速度次之,鸭胴体质量影响最小;最优

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment				
试验编号	A	B	C	$Q/\%$
1	1	1	1	16.93
2	1	2	2	18.64
3	1	3	3	19.12
4	2	1	2	8.98
5	2	2	3	3.29
6	2	3	1	7.56
7	3	1	3	11.56
8	3	2	1	8.49
9	3	3	2	8.46
$\overline{k_{1j}}$	18.23	12.49	10.99	
$\overline{k_{2j}}$	6.61	10.13	12.03	
$\overline{k_{3j}}$	9.49	11.71	11.32	
极差 R_j	11.62	2.35	1.04	

表 3 方差分析结果

Table 3 Results of analysis of variance						
因素	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
A	220.02	2	110.01	10.33	0.088	不显著
B	8.58	2	4.29	0.40	0.690	不显著
C	1.69	2	0.85	0.08	0.923	不显著
误差	21.30	2	10.65			
总平方和	251.59	8				

的开膛参数组合为刀具转速 10 r/min、挂链牵引速度 0.086 m/s、鸭胴体质量 1.8~2.2 kg。为了进一步验证创制的冷鲜鸭胴体自动开膛装置在上述最优参数条件下开膛误差率的稳定性,选取体质量处于 1.8~2.2 kg 区间的冷鲜鸭胴体进行 5 组开膛验证实验,试验结果如表 4 所示。5 组验证实验的膛口误差率平均值为 3.40%。由于鸭胴体关键体尺参数并非完全一致,导致验证实验的膛口误差率存在波动现象,但平均整体误差较小,可以满足实际生产线要求。因此,冷鲜鸭胴体自动开膛装置的最优参数

表 4 验证实验结果

Table 4 Results of verification experiment				
试验编号	L/mm	T/mm	H	$Q/\%$
1	10.68	4.21	0	3.07
2	16.27	2.27	0	3.24
3	18.88	2.86	0	3.83
4	12.34	4.06	0	3.27
5	17.62	2.67	0	3.58
平均值	15.16	3.21	0	3.40

组合为刀具转速 10 r/min、挂链牵引速度 0.086 m/s、鸭胴体质量 1.8~2.2 kg。

5 结论

针对现行肉鸭屠宰分割加工的开膛环节自动化水平低、劳动强度大的问题,基于机械设计、自动控制、模拟分析与参数寻优,创制一种冷鲜鸭胴体自动开膛装置。以开膛参数与开膛误差率分别作为影响因素和指标,引入刀具转速、挂链牵引速度和鸭胴体质量作为三因素,划分三水平,设计正交试验,开展冷鲜鸭胴体自动开膛装置参数寻优。结果表明,所提冷鲜鸭胴体自动开膛装置刀具转速对开膛误差率的影响最大,其次为挂链牵引速度,而鸭胴体质量的影响则相对较小。另外,当刀具转速为 10 r/min、挂链牵引速度为 0.086 m/s 时,所提装置对质量区间为 1.8~2.2 kg 的冷鲜鸭胴体开膛误差率最低,为 3.29%。经验证,该参数组合下膛口误差率结果相对稳定、误差较小,后续将围绕效率提高及普适性扩大展开结构优化,进一步使冷鲜鸭胴体自动开膛装置系统化、实用化和商用化。

参考文献

- [1] 侯水生, 刘灵芝. 2024 年水禽产业与技术发展报告[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(3): 383-387.
HOU S S, LIU L Z. 2024 waterfowl industry and technology development report[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2025, 61(3): 383-387.
- [2] 张海波, 张磊, 吴海洋. 一种家禽屠宰加工用开膛机构: CN202321905993.8[P]. 2024-01-30.
ZHANG H B, ZHANG L, WU H Y. A kind of disemboweling mechanism for poultry slaughtering and processing: CN202321905993.8[P]. 2024-01-30.
- [3] 汪阅, 吴玉兴, 许毅, 等. 一种家禽分割用自动开膛装置: CN202110074167.2[P]. 2022-04-22.
WANG Y, WU Y X, XU Y, et al. An automatic disemboweling device for poultry segmentation: CN202110074167.2[P]. 2022-04-22.
- [4] 蒋俊强, 王丽红, 叶金鹏, 等. 家禽自动开膛装置的研究现状及应用[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(1): 64-66.
JIANG J Q, WANG L H, YE J P, et al. Research and application of apparatus for opening the body cavity of poultry[J]. Packaging and Food Machinery, 2016, 34(1): 64-66.
- [5] 涂本帅. 基于视觉的猪胴体智能开膛机器人系统研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 9-17.
TU B S. Research on intelligent pig carcass cutting robot system based on vision[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022: 9-17.
- [6] 李振强, 王树才, 赵世达, 等. 基于机器视觉和机器学习的羊骨架自动分割方法[J]. 食品与机械, 2020, 36(6): 125-132.
LI Z Q, WANG S C, ZHAO S D, et al. The calculation methods of goat trunk's segmentation trajectory based on machine vision and machine learning[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6): 125-132.
- [7] XU W D, HE Y C, LI J H, et al. Robotization and intelligent digital systems in the meat cutting industry: from the perspectives of robotic cutting, perception, and digital development[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 135: 234-251.
- [8] 中华人民共和国农业农村部. 畜禽肉分割技术规程 鸭肉: NY/T 3962—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Code of practice for livestock and poultry meat fabrication—Duck meat: NY/T 3962—2021[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [9] 张翼飞. 新型鲜桃切分去核机设计与分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 83-89.
ZHANG Y F. Design and analysis of a new type of fresh peach slitting machine[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 83-89.
- [10] 卢利平. 一种拖拉机核心执行机构的可靠性分析[J]. 农机化研究, 2024, 46(2): 265-268.
LU L P. Reliability analysis of a tractor core actuator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(2): 265-268.
- [11] 成大先. 机械设计手册[M]. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2016: 4-25.
CHENG D X. Hand book of machine design[M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 4-25.
- [12] 胡军, 封超, 刘昶希, 等. 基于多传感器同步采集的喷雾机喷嘴性能检测仪设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 305-313.
HU J, FENG C, LIU C X, et al. Design and testing of sprayer nozzle performance testing instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 305-313.
- [13] PMJ GROUP B V. Method to eviscerate poultry, a pre-evisceration device, an evisceration system, and a collector device: US202017616945[P]. 2023-01-03.
- [14] 王建楠, 刘敏基, 胡志超, 等. 绿豆干法脱皮设备关键参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 312-318.
WANG J N, LIU M J, HU Z C, et al. Optimization and experiment on key parameters of dehuller for dried mung beans [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 312-318.