DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2026.01.016

火腿仿形可变量自动上盐机的设计与试验

郑涛[1]，马晓钟[2]，樊明东[2]，盛珂[1]，周钰琳[3]，陈长卿[4*]

(1. 浙江省农业机械研究院，浙江金华，321000；2. 金字火腿股份有限公司，浙江金华，321000；
3. 金华博扬科技有限公司，浙江金华，321000；4. 金华市丘陵山地适用农机重点实验室，浙江金华，321000)

摘要：针对我国火腿上盐腌制工序缺乏自动化设备且依赖工人技术和经验导致火腿含盐量波动大、生产效率低的问题，为稳定火腿含盐量、提升火腿品质，本研究遵循传统制作工艺，设计研制了一款集成机器视觉、动态变量控制与三维仿形技术的火腿仿形可变量自动上盐机。阐述上盐机整机结构和工作原理，对腿坯转移机构、视觉检测机构、自动上盐机构等关键部件进行分析和设计。该上盐机实现了火腿腌制过程中盐量精准计算、非均匀路径规划与自适应喷盐的全流程自动化，解决了因原料腿坯形态不规则、重量差异显著导致含盐量不稳定的难题；提出基于机器视觉的腿坯三维特征识别方法，通过高精度摄像头捕捉腿坯形态特征并构建“三签位”关键区域数据，结合深度学习算法生成差异化喷盐路径，使盐量分布匹配传统工艺中“三签位多盐、肌间少盐”的要求；设计动态称重—精准供盐协同系统，采用重力传感与分级振动盘联控技术，通过PID算法动态修正振动盘振幅，确保实际出盐重量精度在±5 g以内；设计三轴直线模组驱动的柔性上盐机械臂，集成轨迹实时修正功能，使喷盐头在三维空间内达到1 mm定位精度，配合可变口径喷嘴动态调节喷盐强度与行进速度(0～0.3 m/s)，显著提升复杂曲面腿坯的盐层非均匀性要求。试验结果表明：该上盐机在6～15 kg腿坯质量范围内，生产效率达123只/h，上盐量平均误差率7.42%，适用范围广、上盐量误差小，各参数满足设计要求。本研究实现了火腿上盐工序的全程自动化，为传统肉制品加工业的标准化与智能化转型提供了关键技术支撑。

关键词：火腿；上盐腌制；自动上盐机；仿形设计；可变量控制；机器视觉

中图分类号：S24 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-7217(2026)01-0151-07

郑涛，马晓钟，樊明东，盛珂，周钰琳，陈长卿. 火腿仿形可变量自动上盐机的设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2026，7(1)：151－157

ZHENG Tao, MA Xiaozhong, FAN Mingdong, SHENG Ke, ZHOU Yulin, CHEN Changqing. Design and experimentation of a contour-adaptive variable-rate automatic salting machine for ham [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2026, 7(1): 151－157

0 引言

火腿因其独特的风味和丰富的营养价值，已成为全球广受欢迎的发酵肉制品。近年来，我国火腿产业呈现快速增长态势，以传统产区金华为例，2024年前三季度火腿产量达350万条，产值超17亿元，同比分别增长16%和17.2%。然而，与西班牙伊比利亚火腿、意大利帕尔马火腿等国际知名产品相比，我国火腿产业仍面临标准化程度低、工艺创新不足等挑战。国务院及地方性文件明确提出，通过财政补贴、技术标准制定和设备升级补助等举措，推动肉类加工向智能化、精细化转型[1-2]。目前，国外生猪采用工业化养殖和屠宰技术，原料腿坯的重量误差很小，可以采用定量上盐机均匀上盐。而国内生猪品类繁多，养殖方式多样化，屠宰条件不统一，原料腿坯大小、重量差别较大，同一批次的腿坯重量相差两倍之多[3-6]。火腿腌制需要一定量的食盐，若腌制盐分过多，会影响火腿的品质，若腌制时含盐量过低则易造成火腿腐败，因此火腿腌制食盐的添加量对火腿的防腐及后期的发酵极为重要[7-11]。国内上盐工艺多为手工操作，容易造成火腿中含盐量不稳定，王维毅等学者开发的火腿上盐装置实现了基础的抹盐功能，但缺乏对上盐量的调控和上盐位置的识别[12-17]。本研究针对我国火腿生产的现状，研制一款根据火腿腿坯重量自动调整上盐量，并按腿坯形状进行非均匀上盐的自动上盐机，以达到传统火腿制作工艺要求，稳定火腿含盐量，提升火腿品质。

收稿日期：2025-02-19 修回日期：2025-03-28

基金项目：金华市重点科技计划(2023-2-031)

第一作者：郑涛，男，1985年生，浙江金华人，高级工程师；研究方向为智能农业机械。E-mail：52380832@qq.com

*通信作者：陈长卿，男，1980年生，贵州遵义人，正高级工程师；研究方向为农业机械装备。E-mail：496533235@qq.com

1 整机结构与工作原理

火腿仿形可变量自动上盐机结构如图1所示,主要由上料机构、检重机构、转移机构、视觉检测机构、上盐机构、出料机构等组成,整机可对火腿腿坯自动称重并计算出加盐量,按照火腿生产工艺"三签位"盐多、肌肉处盐少的要求,为每只腿坯规划出不同的上盐路径,进行连续式非均匀上盐作业[18-20]。

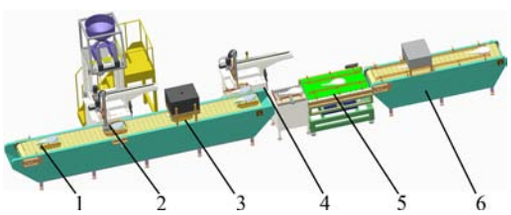


图1 上盐机结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of the salt-spreading machine structure

1. 出料机构 2. 上盐机构 3. 视觉检测机构
4. 转移机构 5. 检重机构 6. 上料机构

上盐机技术参数如表1所示。上盐机工作时,将火腿腿坯依次放入上料机构,由输送带向前输送,若腿坯间隔过小,可由防堵装置调整间隔大于一个腿坯长度。腿坯进入检重机构后,系统自动进行称重,按预设上盐比例计算用盐量。称重后的腿坯进入转移机构的接驳工位,再由机械臂转移至定位工位,通过主输送带向前输送至视觉检测机构。机器视觉通过数据库学习,识别出"左右腿"和"三签位",再根据腿坯形状自动绘制出上盐路径。主输送带再将腿坯输送至上盐工位,上盐机构将对应的用盐量按照上盐路径喷撒至腿坯上表面,上盐结束后输送至出料工位。

表1 上盐机技术参数

Table 1 Technical parameters of the salt-spreading machine

参数	数值/方式
适用上盐腿坯质量/kg	6~15
生产效率/(只·h^{-1})	≥120
上盐量平均误差率/%	≤10
上盐量自动计算功能	具备
腿坯自动仿形功能	具备

2 关键部件设计

2.1 腿坯转移机构设计

腿坯转移机构由接驳工位、转移叉架、转移机械臂、定位工位等组成,如图2所示。火腿腿坯自动称重后输送至接驳工位的辊筒上,前端行程开关感应后停止转动辊筒,确定腿坯的纵向位置,再由气缸调整腿坯横向位置。定位完成后,转移机械臂带动转移叉架从腿坯下方的辊筒间隙中将腿坯抬起,平移至定位工位上,再将转移叉架从腿坯下方的凹槽中退出。至此,火腿腿坯由自由状态变为定位状态。

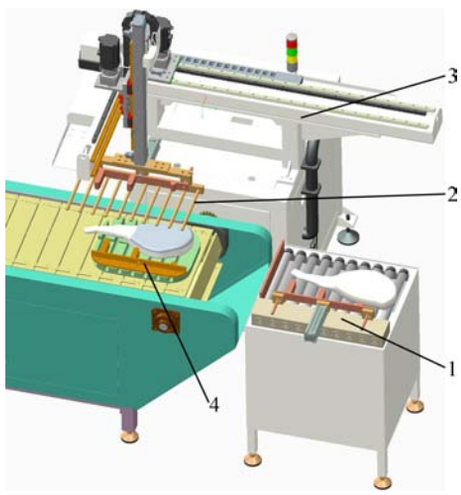


图2 腿坯转移机构示意图

Figure 2 Schematic diagram of the ham transfer mechanism

1. 接驳工位 2. 转移叉架 3. 转移机械臂 4. 定位工位

腿坯转移机构的运动部件主要由三轴丝杆模组组成,其电机的选型直接影响机构的工作性能。控制丝杆模组的电机分为步进电机和伺服电机两类,考虑到伺服电机适合高速、高负载场合,运动精度也相对较高,腿坯转移机构的电机选用伺服电机。根据腿坯重量、转移叉架重量等参数,计算分析电机所需的参数,根据式(1)可以计算丝杆所承受的轴向力。

$$F = m \cdot g \cdot \mu \cdot \eta \tag{1}$$

式中:F——轴向力,N;

m——承载物体的质量,kg;

g——重力加速度,取9.8 m/s^2;

μ——摩擦系数;

η——余量系数。

根据式(2)计算电机的扭矩。

$$T = \frac{F \cdot d}{2} \tag{2}$$

式中:T——电机扭矩,N·m;

d——丝杆导程,m。

根据式(3)计算丝杆的转速。

$$n = \frac{v}{d} \tag{3}$$

式中:n——电机转速,r/min;

v——丝杆移动速度,m/min。

根据式(4)计算电机功率。

$$P = \frac{T \cdot n}{9\,550} \tag{4}$$

式中：P——电机功率，kW。

转移机构z轴丝杆导程为5 mm，有效行程为300 mm，所需移动速度为10 m/min，负载为40 kg，受力方向为轴向，故摩擦系数取1.3，余量系数取1.4；y轴丝杆导程为10 mm，有效行程为600 mm，所需移动速度为20 m/min，负载为80 kg，受力方向为径向，故摩擦系数取0.3，余量系数取1.4；x轴丝杆导程为15 mm，有效行程为1 200 mm，所需移动速度为30 m/min，负载为120 kg，受力方向为径向，故摩擦系数取0.3，余量系数取1.4。根据上述公式计算出转移电机的参数，见表2。

表2　转移电机参数

Table 2　Transfer motor parameters

名称	轴向力F_1/N	扭矩T_1/(N·m)	转速n_1/(r·min^{-1})	功率P_1/kW
转移z轴	713.44	1.78	2 000	0.37
转移y轴	329.28	1.65	2 000	0.34
转移x轴	493.92	3.70	2 000	0.78

2.2　视觉检测机构设计

视觉检测机构由检测工位、机器视觉箱、控制柜等组成，如图3所示。视觉检测工位有恒定色温和亮度的补光灯，火腿腿坯输送至检测工位后，由机器视觉箱中的视觉检测摄像头对腿坯进行拍照，系统根据数据库中腿坯模型自主识别腿坯形状、尺寸和“三签位”位置[21-23]，按照“三签位”上盐量最多和渐远渐少的原则，自动构建上盐路径，并根据用盐量和路径长度确定喷撒盐组件的行走速度。



图3　视觉检测机构

Figure 3　Vision inspection mechanism

1. 检测工位　2. 机器视觉箱　3. 控制柜

视觉检测系统采用固定阈值分割的方法将腿坯从托盘中分离出来。首先，通过Open CV软件库对相机采集的图片进行灰度化处理；然后，设置一个固定的灰度阈值作为分割界限，将图片中的每个像素的灰度值与固定阈值进行比较，把灰度值大于阈值的像素归类为腿坯区域，而灰度值小于或等于阈值的像素则归类为托盘背景；最后，输出分割后的图像，图像中腿坯区域被标记为黑色，背景区域被标记为白色，从而实现了腿坯与背景的有效分离。随后，使用Suzuki-Abe边界跟踪算法对分割后的腿坯区域进行轮廓提取。该算法通过遍历图像中的像素，沿着边缘进行跟踪，并记录边界点的坐标，从而精确地勾勒出腿坯的轮廓。在提取边界点的过程中，考虑到提取到的边界点可能非常密集，我们采用链式编码的方法来去除冗余的边界点，保留体现轮廓的关键点，从而提高识别速度。最终，按照设定的等间距步长选取边界上的点进行提取，再截取一个固定范围将无效点去除，形成外轮廓坐标点，如图4所示。外轮廓坐标点向轮廓中心偏移60 mm，形成新的轮廓坐标点，连接各点即为腿坯环形上盐路径，如图5所示。

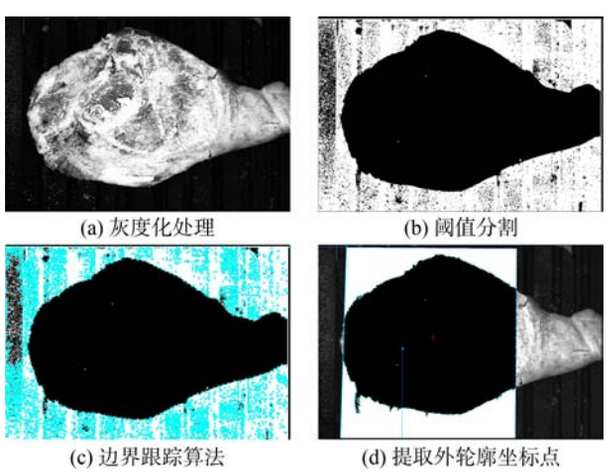


图4　视觉检测分割方法

Figure 4　Vision inspection segmentation method

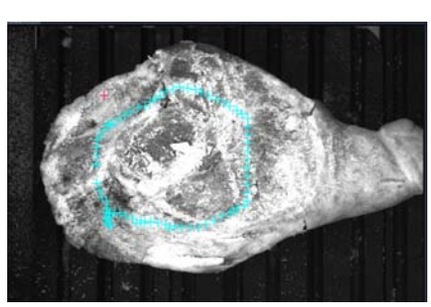


图5　构建环形上盐路径

Figure 5　Construction of the circular salt-spreading path

用上述方法分别选取腿坯两端向内偏移50 mm位置区域，识别边界点后取y轴方向中心点A和B，A、B点连线即为腿坯中心线。按“三签位”上盐工艺要求，以腿坯中心线为基准，在中心线上方取$C1-C5$共5个点，下方取$D1-D5$共5个点，10个点作为“三签位”上

盐路径的折点,依次连接各点即为“三签位”上盐路径,此路径可覆盖“三签位”区域,达到上盐多的效果,如图6所示。

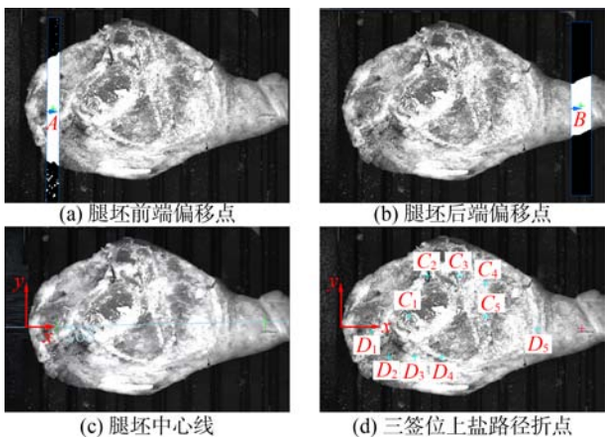


图6 构建三签位上盐路径

Figure 6 Construction of the three-marker salt-spreading path

$C1-C5$、$D1-D5$折点的x轴、y轴坐标值按式(5)、式(6)计算,各折点坐标的系数如表3所示,系数根据腿坯批次预设,也可人工调整。

$$x = L_{AB} \cdot \alpha \tag{5}$$

式中:x——x轴坐标,mm;

L_{AB}——AB点距离,mm;

α——x轴坐标系数。

$$y = L_y \cdot \beta \tag{6}$$

式中:y——y轴坐标,mm;

L_y——腿坯y轴方向宽度,mm;

β——y轴坐标系数。

表3 折点坐标系数

Table 3 Breakpoint coordinate coefficients

	α	β		α	β
$C1$	0.35	0.10	$D1$	0.15	0.10
$C2$	0.40	0.55	$D2$	0.25	0.45
$C3$	0.55	0.55	$D3$	0.35	0.45
$C4$	0.65	0.45	$D4$	0.50	0.45
$C5$	0.65	0.10	$D5$	0.90	0.10

2.3 自动上盐机构设计

自动上盐机构是上盐机的核心部分,其工作效率和质量直接影响整机的生产效率和误差率。上盐机构由上盐工位、喷撒盐组件、上盐机械臂、定量出盐装置、盐仓等组成,如图7所示。

定量出盐装置设计动态称重—精准供盐协同系统,采用重力传感与分级振动盘联控技术,通过PID算法动态修正振动盘振幅,达到所需重量后停止振动,确保实际出盐重量精度在±5 g以内;当前腿坯对应的定量食盐位于小盐斗中,打开小盐斗封盖,定量食盐通过下盐管道进入喷撒盐组件的喷撒盐头中。喷撒盐组件位于上盐机械臂末端,上盐机械臂由x、y、z3个方向的直线模组组成,喷撒盐组件通过上盐机械臂沿着上盐路径行走,集成轨迹实时修正功能,使喷盐头在三维空间内达到1 mm定位精度,配合可变口径喷嘴动态调节喷盐强度与行进速度(0~0.3 m/s),以达到腿坯表面非均匀上盐的效果。

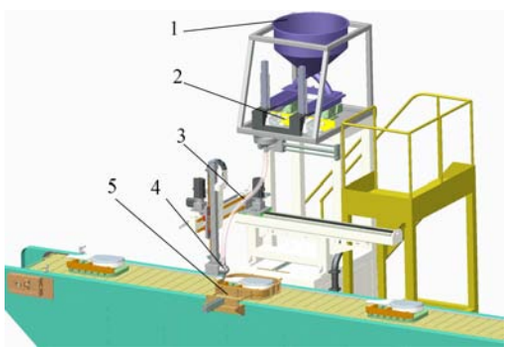


图7 上盐机构示意图

Figure 7 Schematic diagram of the salt-spreading mechanism

1. 盐仓 2. 定量出盐装置 3. 上盐机械臂
4. 喷撒盐头 5. 上盐工位

上盐机构z轴丝杆导程为5 mm,有效行程为200 mm,所需移动速度为10 m/min,负载为30 kg,受力方向为轴向,故摩擦系数取1.3,余量系数取1.4;y轴丝杆导程为10 mm,有效行程为600 mm,所需移动速度为20 m/min,负载为50 kg,受力方向为径向,故摩擦系数取0.3,余量系数取1.4;x轴丝杆导程为10 mm,有效行程为800 mm,所需移动速度为20 m/min,负载为80 kg,受力方向为径向,故摩擦系数取0.3,余量系数取1.4。根据式(1)—式(4)计算出上盐电机的参数,见表4。自动上盐效果如图8所示。

表4 上盐电机参数

Table 4 Salting motor parameters

名称	轴向力F_2/N	扭矩T_2/(N·m)	转速n_2/(r·min^{-1})	功率P_2/kW
上盐z轴	535.08	1.34	2 000	0.28
上盐y轴	205.80	1.03	2 000	0.22
上盐x轴	329.28	1.65	2 000	0.34



图8 上盐效果

Figure 8 Salt-spreading effect

3　试验与分析

3.1　试验目的

本试验在火腿加工车间以真实火腿腿坯为试验对象，进行火腿仿形可变量自动上盐机性能试验，测定所研制的上盐机的生产效率、上盐量平均误差率等技术参数，并评估其工作性能。

3.2　试验条件

试验地点为金华金字火腿有限公司火腿加工车间，火腿腿坯重量范围为6～15 kg，腿坯进出上盐机由人工搬运，试验数量60只。

3.3　试验方法

1)生产效率。生产效率指上盐机正常工作状态下连续作业的纯工作小时生产率。记录试验完成上盐腿坯数量所需要的时间，并按式(7)计算，单次试验不少于20只腿坯，试验3次，取平均值。

$$p = N \times \frac{60}{t} \tag{7}$$

式中：p——生产效率，只/h；

N——试验时间内的上盐腿坯数量，只；

t——试验时间，min。

2)上盐量平均误差率。上盐量平均误差率指上盐机根据腿坯重量自动计算的应上盐量和实际上盐量的差值与应上盐量的比值。在上盐机操作系统中输入应上盐系数q(表5)，依次记录每只腿坯原始质量m_1和上盐后的质量m_2，并按式(8)—式(10)计算，单次试验不少于20只腿坯，试验3次，取平均值。

表5　应上盐系数q的推荐值

Table 5　Recommended values of the salt-spreading coefficient q

上盐道数	应上盐系数/%
二道盐	4.9～5.1
三道盐	2.9～3.1

$$m_t = m_1 \cdot q \tag{8}$$

式中：m_t——应上盐量，g；

m_1——腿坯原始质量，g；

q——应上盐系数，%。

$$\Delta m = m_2 - m_1 \tag{9}$$

式中：Δm——实际上盐量，g；

m_2——上盐后的质量，g。

$$\gamma = \frac{|\Delta m - m_t|}{m_t} \times 100\% \tag{10}$$

式中：γ——上盐量误差率，%。

3.4　试验结果

在试验过程中，火腿仿形可变量自动上盐机运行良好，性能稳定，能够较好完成自动上盐作业。试验结果如表6、表7所示，生产效率为123只/h，上盐量平均误差率为7.42%。

表6　生产效率试验结果

Table 6　Results of production efficiency tests

序号	腿坯数量/只	试验时间/min	生产效率/(只·h^{-1})
1	20	9.70	124
2	20	9.85	122
3	20	9.77	123
3次试验取平均			123

表7　上盐量平均误差率试验结果

Table 7　Test results of the average error rate in salt-spreading quantity

序号	腿坯数量/只	平均误差率/%
1	20	7.58
2	20	6.01
3	20	8.68
3次试验取平均		7.42

4　结论

针对我国火腿上盐腌制工序缺乏自动化设备及相关研究不多的现状，团队研制一种火腿仿形可变量自动上盐机，并进行试验验证。

1)确定整机结构和工作原理，上盐机主要由上料机构、检重机构、转移机构、视觉检测机构、上盐机构、出料机构等组成，具备上盐量自动计算功能和自动仿形功能，可进行连续式非均匀上盐作业。

2)进行试验验证，结果表明：生产效率为123只/h，上盐量平均误差率为7.42%，检重机构、转移机构、视觉检测机构、上盐机构等运行良好，符合设计要求。

参　考　文　献

[1] 范子超，杨延辰，丁有河，等. 我国干腌火腿生产技术现状及展望[J]. 肉类工业，2019(1)：48－51，57.
FAN Zichao，YANG Yanchen，DING Youhe，et al. Present situation and prospect of production technology of dry-cured ham in China [J]. Meat Industry，2019(1)：48－51，57.

[2] 马晓钟，王新洁，董晓尉. 中式干腌火腿现状与现代化加工技术实践——以金华火腿为例[J]. 肉类工业，2022(6)：1－6.
MA Xiaozhong，WANG Xinjie，DONG Xiaowei. Present

situation of Chinese dried and cured ham and practice of modern processing technology—take Jinhua ham as an example [J]. Meat Industry, 2022(6): 1－6.

[3] 柴宇虬. 低盐干腌火腿生产工艺自动化实现方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
CHAI Yuqiu. Study on the method of automatic production of low salt dry cured ham [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.

[4] 杨杭. 火腿上盐装置设计及其上盐均匀度检测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
YANG Hang. Design of salting device for ham and its salting uniformity detection [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.

[5] SÁNCHEZ A J, ALBARRACIN W, GRAU R, et al. Control of ham salting by using image segmentation [J]. Food Control, 2008, 19(2): 135－142.

[6] DU C J I N, SUN D A W E N. Correlating shrinkage with yield, water content and texture of pork ham by computer vision [J]. Journal of Food Process Engineering, 2005, 28(3): 219－232.

[7] 陈娟, 钟苑仪, 富国文, 等. 干腌火腿新型减盐策略及其机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 435－444.
CHEN Juan, ZHONG Yuanyi, FU Guowen, et al. Research progress on novel salt reduction strategy and mechanism of dry-cured ham [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 435－444.

[8] 曾弢, 章建浩, 甄宗圆, 等. 干腌火腿现代滚揉腌制工艺研究[J]. 食品科学, 2007(2): 88－91.
ZENG Tao, ZHANG Jianhao, ZHEN Zongyuan, et al. Technique study on knead-salting modern processing of dry-cured ham [J]. Food Science, 2007(2): 88－91.

[9] CABALLERO D, CARO A, RODRÍGUEZ P G, et al. Modeling salt diffusion in Iberian ham by applying MRI and data mining [J]. Journal of food engineering, 2016, 189: 115－122.

[10] IQBAL A, VALOUS N A, MENDOZA F, et al. Classification of pre-sliced pork and Turkey ham qualities based on image colour and textural features and their relationships with consumer responses [J]. Meat Science, 2010, 84(3): 455－465.

[11] 刘鑫, 牟柏德, 鞠铭, 等. 基于SPME-GC-MS、电子鼻、电子舌技术联用对不同替代盐干腌火腿风味成分表征[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 246－256.
LIU Xin, MU Baide, JU Ming, et al. Characterization of flavor components of dry-cured ham with different salt substitute formulations using solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, electronic nose and electronic tongue [J]. Meat Science, 2022, 43(6): 246－256.

[12] 宣威市康发火腿有限公司. 一种火腿加工上盐装置: 202421150107.X[P]. 2025－01－10.

[13] 昆明理工大学. 一种低盐火腿的腌制方法和装置: 202310369302.5[P]. 2025－01－03.

[14] 贵州杨老奶食品有限公司, 贵州昊霖食品开发有限责任公司. 一种自动抹盐滚揉的火腿加工机及其使用方法: 201811088012.9[P]. 2023－11－14.

[15] 义乌市题升食品有限公司. 一种均匀撒盐装置: 202320744365.X[P]. 2023－10－13.

[16] 义乌市题升食品有限公司. 一种控量撒盐机: 202320842105.6[P]. 2023－10－13.

[17] 范子超. 干腌火腿的辊揉机构研究与开发[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2019.
FAN Zichao. Research and development of roller-kneading mechanism for dry-cured ham [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2019.

[18] 马晓钟, 王新洁, 郭如斌. 传统金华火腿腌制用盐量的控制研究[J]. 肉类工业, 2019(3): 12－16.
MA Xiaozhong, WANG Xinjie, GUO Rubin. Study on control of salt dosage in curing of traditional Jinhua ham [J]. Meat Industry, 2019(3): 12－16.

[19] 金字火腿股份有限公司, 金华市农业科学研究院(浙江省农业机械研究院). 一种火腿仿形可变量自动上盐机: 202311374644.2[P]. 2024－06－28.

[20] 金字火腿股份有限公司, 金华市农业科学研究院(浙江省农业机械研究院). 一种全自动火腿上盐设备: 202311370350.2[P]. 2024－08－13.

[21] 于英杰, 吴坤澍, 冉朋鑫, 等. 基于改进YOLOv7的核桃仁分级研究与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(4): 17－23.
YU Yingjie, WU Kunshu, RAN Pengxin, et al. Research and experiment on walnut kernel grading based on improved YOLOv7 [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(4): 17－23.

[22] 唐伯青, 赵大勇, 熊锋, 等. 基于视觉自注意力模型的苗期玉米与杂草检测方法[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(4): 772－781.
TANG Boqing, ZHAO Dayong, XIONG Feng, et al. Detection method of maize and weeds at seedling stage based on visual self-attention model [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(4): 772－781.

[23] 郭琪, 范艺璇, 闫新焕, 等. 多源数据融合技术在苹果无损检测中的应用研究进展[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(4): 31－46.
GUO Qi, FAN Yixuan, YAN Xinhuan, et al. Advances in the application of multi-source data fusion technology in non-destructive detectionof apple [J]. Smart Agriculture, 2025, 7(4): 31－46.

Design and experimentation of a contour-adaptive variable-rate automatic salting machine for ham

ZHENG Tao[1], MA Xiaozhong[2], FAN Mingdong[2], SHENG Ke[1], ZHOU Yulin[3], CHEN Changqing[4*]

(1. *Zhejiang Academy of Agricultural Machinery*, *Jinhua* 321000, *China*; 2. *Jinzi Ham Co., Ltd.*, *Jinhua* 321000, *China*; 3. *Jinhua Boyang Technology Co., Ltd.*, *Jinhua* 321000, *China*; 4. *Jinhua City Key Laboratory of Agricultural Machinery for Hilly and Mountainous Areas*, *Jinhua* 321000, *China*)

Abstract: To address the challenges of inconsistent salt content and low production efficiency in traditional Chinese ham curing processes—issues arising from the reliance on manual expertise and the lack of automated salting equipment—this study developed an automated three-dimensional profiling and variable-rate salting machine. The system integrates machine vision, dynamic variable control, and 3D contouring technology while adhering to traditional craftsmanship. The overall structure and operational principles of the salting machine are elaborated with detailed analysis and design of key components, including the ham transfer mechanism, vision detection system, and automated salting mechanism. The machine achieves full-process automation in salt quantity calculation, non-uniform path planning, and adaptive salt spraying, effectively resolving the instability caused by irregular ham morphology and significant weight variations. A machine vision-based 3D feature recognition method is proposed, utilizing high-precision cameras to capture morphological characteristics and construct a "three-pick positions" database for key salting regions. Combined with deep learning algorithms, this method generates differentiated salting paths that align with the traditional requirement of "more salt at three-pick positions, less salt in intermuscular areas". A dynamic weighing-precision salting collaborative system is designed, incorporating gravity sensing and a graded vibratory feeder controlled via PID algorithms to dynamically adjust vibration amplitude, ensuring salt dispensing accuracy within ±5 g. A three-axis linear-module-driven flexible robotic arm integrates real-time trajectory correction, achieving 1 mm positioning accuracy for the salting nozzle. Coupled with a variable-aperture nozzle that dynamically adjusts salting intensity and travel speed (0—0.3 m/s), the system significantly enhances salt layer uniformity on complex curved ham surfaces. Experimental results demonstrate that the machine achieves a production rate of 123 hams/hour within a ham carcass weight range of 6—15 kg, with an average salt application error rate of 7.42%, meeting design requirements in adaptability and precision. This research realizes full automation of the ham salting process and provides critical technical support for the standardization and intelligent transformation of traditional meat processing industries.

Keywords: ham; salt-curing; automatic salting machine; profile-adaptive design; variable-rate control; machine vision

Foundation items: Jinhua City Key Science and Technology Program (2023-2-031)

First Author: ZHENG Tao, E-mail: 52380832@qq.com

* **Correspondence Author:** CHEN Changqing, E-mail: 496533235@qq.com