

注水肉超声波无损检测装置及特征阈值的提取

Ultrasonic nondestructive testing device for water-injected meat and extraction of feature threshold

刘朝鑫 李明 甘富航 张维华 王润涛
LIU Zhao-xin LI Ming GAN Fu-hang ZHANG Wei-hua WANG Run-tao
(东北农业大学电气工程与信息学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)
(Department of Electrical Engineering and Automation of Northeast Agricultural University,
Harbin, Heilongjiang 150030, China)

摘要:针对注水肉问题与缺少民用注水肉检测装置的情况, 研制了基于超声波能量分析的便携式注水肉无损检测装置, 并通过试验对频率分级特征、特征半波、 δ_0 幅值等特征量值进行分析, 以确认注水肉检测的特征阈值。研究结果表明: 注水肉检测特征半波 δ_0 的幅值 4.010 V 为阈值; 验证实验结果证明该装置对宰后注水肉的分级精度达到 98.8%。

关键词: 注水肉; 无损检测; 超声波; 特征半波

Abstract: Targeting the water-injected meat issue and lack of the household inspective devices, developed a portable non-destructive ultrasonic inspective device on water-injected meat. Basing on the ultrasonic energy analysis, the final characteristic threshold is confirmed by analyzing characteristic values, like the characteristics of frequency, characteristic half-wave, and δ_0 amplitude, through related experiments. As the results imply, 4.010 V, the obtained δ_0 amplitude of characteristic half-wave, is the final threshold. The non-destructive ultrasonic inspective device on water-injected meat reaches a high grading accuracy of 98.8%.

Keywords: water-injected meat; nondestructive testing; ultrasonic; characteristic half-wave

传统的注水肉检测方法有感官鉴别法、pH 值法^[1]、生物电阻抗法^[2]。其中, 感官鉴别法会因个体感官差异直接影响检测结果的准确性, 或因个体经验的差异而具有主观性; pH 值法的指标 pH 值因只与肉体表面含水量相关性强, 无法辨别出活禽灌水或宰后血管注水的肉品而缺乏可靠性; 物理损失法通过蒸煮加热的方式测出肉品去水后的失重率来检测

注水程度, 所得结果可信, 但破坏性过强, 无法对市场肉品进行普查; 生物电阻抗法易受外界干扰, 如肉品的形状、肉品表皮状态都将直接影响检测结果^[3]。

发达国家将无损检测技术应用于肉质检测起步较早, Simal 等^[4]通过超声波波谱发现肉质结构与肉品含水率相关, 研究得知肉品注水后肉质中脂肪和蛋白质的分布发生改变而导致肉质结构的改变。Hazlrwood 等^[5-7]通过核磁共振技术检测出了肉质中自由水、组织水和流动水的含量及水在肉中的弛豫时间, 并建立了相关的数学模型来确定肉的含水量。但这些先进技术仅在国外专业研究中得以应用。张云海等^[8-9]研制了用于肉品品质检测的红外光谱成像仪, 该装置可以完成肉品营养成分分析、嫩度新鲜度评价以及微生物污染程度评定, 但由于成本与使用者技术素养要求过高, 普通市场的监管组织难以推广应用。

本研究拟以注水肉检测为研究对象, 依据超声波穿过含水率不同的肉质时能量衰减具有差异性的原理, 以及超声波信号可转换成电压信号的压电效应^[10], 建立特征半波幅值与肉质含水率一一对应的数据表格, 获得区分注水肉与正常肉的技术方法。同时利用低强度超声波模块价格低、穿透能力强、应用性强的特点, 以 MSP430F248 为核心数据处理芯片, 结合超声波检测终端搭建无损检测硬件平台, 实现成本低、精度高的检测装置的研制。

1 装置的结构与工作流程

1.1 装置的组成部分及其功能

注水肉无损检测装置系统整体结构见图 1。

这些部分相互协调、配合, 以实现装置的功能, 并形成便携的特性。其中, 基础核心部分为超声波振子对, 是发射与接收超声波的基础器件; 控制与数据处理部分由芯片 MSP430F428 系统板和液晶显示屏组成; 能量供给部分由一系列开关电源模块组成, 以将 220 V 交流电转换为支持控制处理系统工作的直流电与驱动振子工作的高频交流电; 机械

基金项目: 东北农业大学 SIPT 项目(编号: 201610224003); 国家科技支撑计划资助项目(编号: 2014BAD06B00); 黑龙江省博士后启动基金资助项目(编号: LBH-215024)

作者简介: 刘朝鑫, 男, 东北农业大学在读本科生。

通信作者: 李明(1984—), 女, 东北农业大学工程师, 硕士。

E-mail: 601939971@qq.com

收稿日期: 2017-03-02

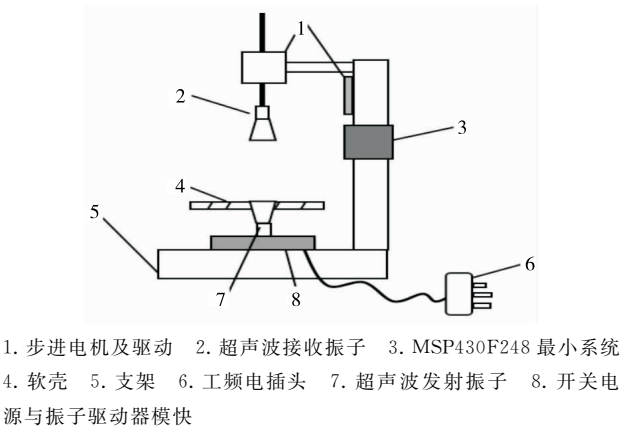


图 1 注水肉无损检测装置
Figure 1 Nondestructive detecting device for water injected meat

支撑部分由低重心支架与步进电机组成,将发射振子置于底部以靠近支架重心,以减缓发射阵子工作时产生的低于超声波频率的杂波所造成的轻微振动。另外,步进电机可以调节接收振子的高度以改变声场的宽度,适应不同厚度的被检肉品,进而提高装置的自动化程度。

系统工作流程图见图 2。把待检肉放置在软壳容器内,启动电源,MSP430F248 单片机系统初始化,通过系统中的步进电机调整超声波接收振子的高度直到振子表面贴到被检肉的上表面并轻压该表面,按下开始检测按钮。嵌于软壳容器的超声波发射振子通过压电效应发出超声波,超声波透过肉质,传播到超声波接收振子,接收振子通过逆压电效应产生电压信号。信号经过滤波、变换后作为可处理信号,由单片机的算法计算,得出可输出结果,根据结果,做出下一步决策:若肉的含水量正常,控制系统结果返回命令,使显示器维持显示状态,显示正常,停止所有驱动;否则,系统返回再次检测命令,依次循环直到进行到第 4 次时,停止所有驱动,显示‘注水’警告。

1.2 硬件选择

1.2.1 芯片 用 MSP430F248 作为数据处理核心和控制外设的控制中心。该芯片具有 10/12 位硬件 A/D 转换器,转换精度较高。另外,MSP430 系列单片机中断为矢量中断,

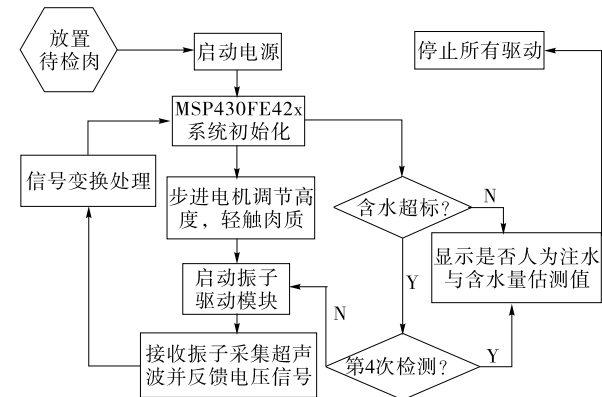


图 2 基于超声波的注水肉检测装置工作流程
Figure 2 Working flow of the device

可支持 10 个以上的中断源。响应中断请求时,激励 CPU 仅需要 6 μ s,因此可以对复杂情况做出快速响应。

1.2.2 步进电机 步进电机又称脉冲电动机,是一种将脉冲信号转变成角位移或线位移的电动机,电动机的转速,停止的位置取决于脉冲信号的频率和脉冲数。令编码器线数为 P ,在一定测速时间 T 中脉冲个数为 M 个,检测时钟脉冲频率为 f ,个数为 m 个,则可得到电机转速的误差:

$$\Delta = \left| \frac{60M}{Pm}f - \frac{60Mf}{P(m \pm 1)} \right| \quad (1)$$

步进电机这一特性使得调高模块机械动作所需的空间最小化。步进电机调高模块的简化图见图 3。

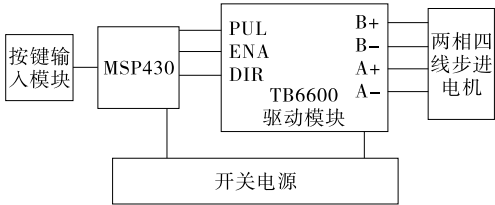


图 3 步进电机调高模块结构图
Figure 3 Structure of height stepper motor drive

1.2.3 发射振子驱动电路 在以 TL494 芯片为核心的变频电路的基础上,改进设计了超声波发射振子驱动器,图 4 为逆变电路原理图,采用全桥逆变电路,使用的是耐高压的场效应管 IRF840。这个模块为发射振子提供足够大的驱动能量,开关管 IRF840 可以提高驱动电路的可靠性。

1.2.4 其他硬件 使用 MSP430F248 自带的 A/D 转换模块采集接受振子产生的信号;显示部分使用的是 12 864 液晶屏,以减少装置的成本;额定频率为 40 kHz 的振子对。

1.3 软件系统设计

系统软件设计的关键是数据的处理,在此基础上是整体算法尽量简洁。关键部分为:在控制核心 MSP430F248 写入与装置预处理数据对应的算法,尤其是特征声波的阈值和频率 ω_0 ,应以实际预处理为准;程序初始化后,等待数据处理的中断命令;对数据进行卡曼滤波,装入数组;积分算法还原采样声波;取出频率为 ω_0 的特征声波的相关数据,存到另一个数组;大小比较,取出最大值作为特征声波的幅值;阈值比较,进入循环显示或再次检测算法。软件设计主要部分的工作流程图见图 5。

2 特征阈值提取试验与结果分析

超声波注水肉无损检测装置通过超声波接收振子、数据变换模块、MSP430F248 片内 12 位 ADC 获得透过肉质的超声波相关参数,控制核心利用这些数据组成声波波谱,从而得到反映肉质含水情况的特征量值。ADC 采样频率设为 60 MHz,采样点 1 200 个,采样时间为 20 μ s。

2.1 对照组与试验组的数据预处理

准备对照组,即正常肉,200 g 的牛羊猪肋骨附近肌肉丰厚的肉各 5 块,并且切成 15 mm 厚;准备试验组,采用宰后直接注水法(一种市面常见的注水法),利用针筒分 3 次注入总量为 50 mL 的蒸馏水,3 次注射的地方应该保持一定的

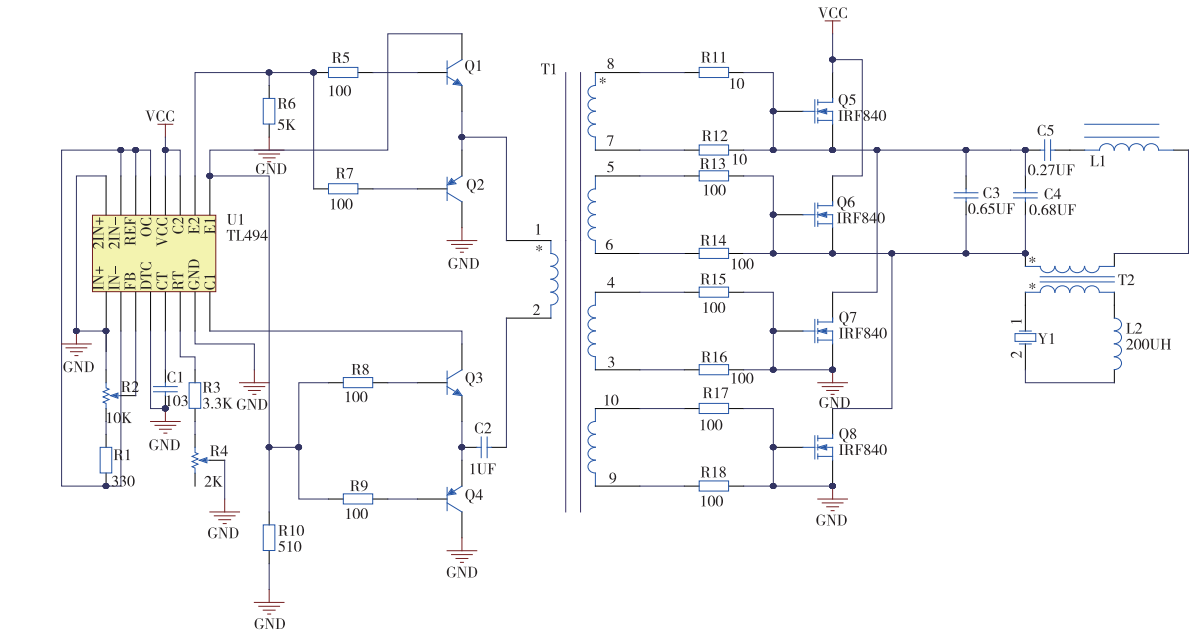


图 4 超声波发射驱动器电路图
Figure 4 Circuit of ultrasonic emission driver

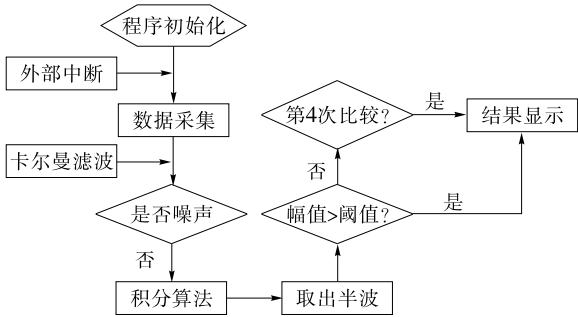


图 5 软件设计主要部分的工作流程图
Figure 5 Working flow chart of key software

距离且相隔 2 min,使注入的蒸馏水在肉质中尽量分布均匀,以减小试验样品差异而造成的误差。本研究首先要获得透过对照组和试验组肉质的超声波数据,生成声波谱。为获得有效数据,控制核心写入卡尔曼滤波算法,否则波形将如图 6(a)所示,很难分析。在预处理中,装置与上位机实时通讯,上位机用 Matlab 进行统计计算。

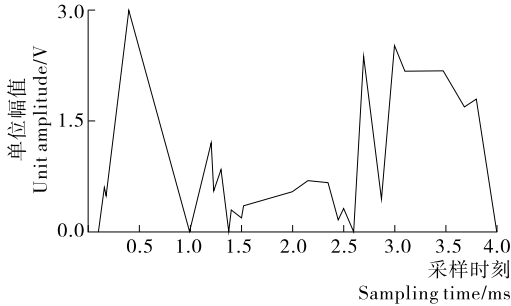
类比数学积分法,还原超声波波形。在采样算法中,将采集的 1 个半波数据作为 1 次采样,对每块肉进行 100 次的采样,得到 100 个半波。对比图 6(c)、(b)波形,发现试验组和对照组的透过波形非常相近。

2.2 频率分级特征提取

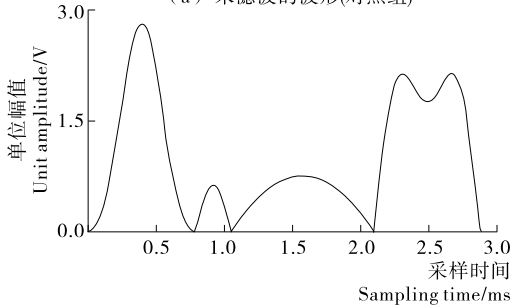
频率分级即指通过对比透过正常肉和注水肉后的声波频率筛出注水肉。因对照组中牛羊猪肉的透过波形相近,本试验在频率分级分析中,仅以猪肉为研究对象,结果统计见图 7。由图 7 可知,对照组和试验组的半波频率特性没有太大差异,无法提取频率分级特征。

2.3 特征半波的提取

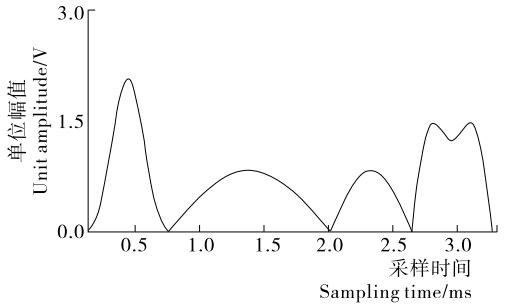
声波能量可由接收端电信号的波形面积间接反映,公式^[11-13]为



(a) 未滤波的波形(对照组)



(b) 滤波后的波形(对照组)



(c) 试验组波形

图 6 部分波形结果

Figure 6 Several waveform results

$$S = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt. \quad (2)$$

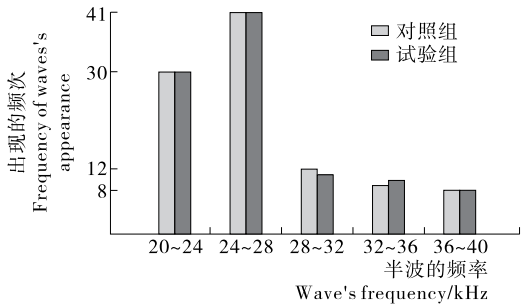


图 7 半波频率特性直方图

Figure 7 Characteristic half wave frequency's histogram

式中:

S ——波形面积数;

$f(t)$ ——各时刻接收的电信号的电压幅值, V ;

t ——采样时刻, ms 。

则接收振子对每块肉每次检测感应到的能量计算式为

$$E = \sum_{n=1}^{100} \int_0^{T_n} V(t) dt, \tag{3}$$

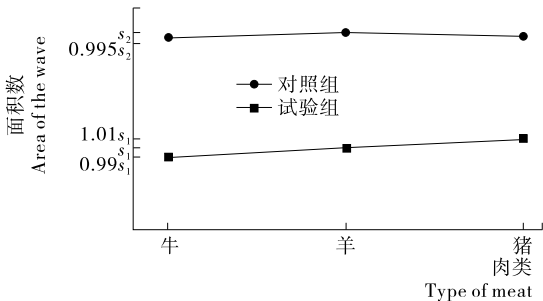
式中:

T_n ——第 n 个半波的周期(n 范围为 $1 \sim 100$), ms ;

$V(t)$ ——实时采样的幅值数据, V ;

E ——100 个半波的面积和。

对预处理中对照组、试验组透过各类肉的波形进行电信号面积计算求均值, 结果见图 8。



s_1, s_2 分别为透过试验组和对照组羊肉后的电信号波形面积平均值

图 8 各组肉类波形面积平均值

Figure 8 Average value of various types of meat's waveform area

由于水的注入, 游离在细胞间的流动水增多, 发生空化作用的水分增多, 使得能量损耗增大, 因此能量可以作为分级特征测出注水肉。

声波的能量由介质的振动传递, 可通过介质的振动算得, 计算式为

$$W = \rho \mu \omega^2 A^2, \tag{4}$$

式中:

ρ ——介质密度, g/cm^3 ;

μ ——波速, m/s ;

ω ——声波频率, kHz ;

A ——幅值, 以测试指标确定单位, 本研究以电压信号为测试指标, V 。

则采集的 1 个半波能量计算式为

$$W_n = \rho \mu \sum_{m=1}^j \omega_m^2 A_m^2, \tag{5}$$

式中:

W_n ——第 n 个半波的能量;

ω_m ——Fourier 分析后的第 m 次正弦波频率, kHz ;

A_m ——Fourier 分析后的第 m 次正弦波幅值, V ;

j ——波的次数, 为无穷量(一般取到 7 次)。

肉质物理化学特性保持不变, 即 ρ 、 μ 保持不变, ω_n 不受肉质的含水率影响。透过注水肉与正常肉的超声波信号的能量差可由电压信号的面积差 ΔW_n 确定, ΔW_n 为无量纲, 抽象为函数式

$$W_n = \rho \mu A_n \sum_{m=1}^j \omega_m^2, \tag{6}$$

$$\Delta W_n = W(A_n) - W(A_n + \Delta A_n), \tag{7}$$

式中:

A_n ——第 n 个半波的幅值, 为对应 A_m 的几何平均值。

则整体的能量损失可表示为

$$\Delta E = \sum_{n=1}^{100} \Delta W_n. \tag{8}$$

由式(6)~(8)可知, 半波的幅值能反映其能量变化的大小, 可作为分级特征。使用振子 1 的情况下得表 1 数据, 分析发现频率为 ω_0 (f_3) 的半波 δ_0 幅值变化最为显著, 则取 δ_0 为特征半波。另外, 发现 δ_0 的频率是与接收发射振子的制作工艺是相关的(见图 9), 振子的工艺不同, δ_0 的频率在 ω_0 附近波动, 因此 ω_0 不能确定为常数, 应以实际装置预处理得到的数据为准。

表 1 幅值变化幅度与频率之间的关系

Table 1 The relationship between amplitude and frequency

f	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
ΔW	0.11	0.25	0.19	4.75	1.32	0.15	0.54	0.29	1.12

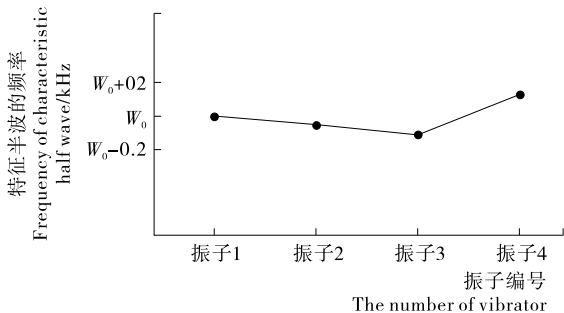


图 9 振子工艺对特征半波频率的影响

Figure 9 The influence of the vibrator's craft on characteristic half wave's frequency

2.4 δ_0 幅值的特征阈值提取

增加 3 个试验组, 注水量为 5, 10, 20 mL, 根据市场情况, 添加的试验组有足够代表性, 用预处理的方法获取声波相关数据, 求各组肉类的 δ_0 声波的幅值, 结果见表 2, 幅值最小值见图 10。

经过数据分析发现牛羊猪注水肉的 δ_0 的幅值不大于 4.010 V。这三者的自然含水量为 75% 左右^[14-16], 所以各方

表 2 特征半波 δ_0 幅值的最小值与平均值

Table 2 The minimum value and average value of special half wave amplitude

注水量/ mL	牛		羊		猪	
	最小幅 值/V	平均幅 值/V	最小幅 值/V	平均幅 值/V	最小幅 值/V	平均幅 值/V
5	3.701	3.705	3.703	3.711	3.707	3.710
10	3.582	3.583	3.579	3.581	3.583	3.588
20	3.206	3.207	3.210	3.210	3.207	3.213
50	2.881	2.883	2.891	2.894	2.898	2.899
0	4.021	4.029	4.012	4.015	4.010	4.014

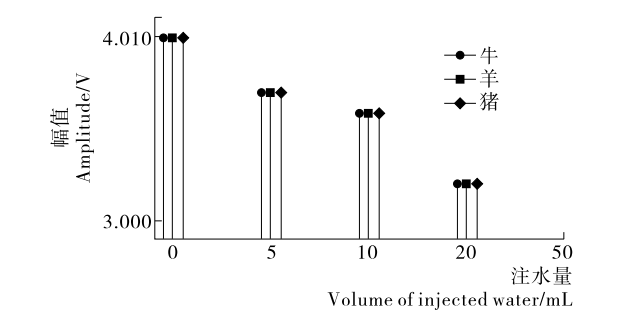


图 10 特征半波幅值的最小值

Figure 10 The minimum amplitude of special acoustic wave

面数据相近。本文最终取 δ_0 的幅值 4.010 V 为阈值,大于该值的为合格肉。同时,振子的制造工艺存在差异,阈值应以装置实际预处理中的数据为准。

3 验证实验

为验证装置可靠性,取 100,200,300,400,500 g 的牛羊猪肉各两块,所取部位为肋骨附近肌肉丰富的肉,共 30 块,切成 15 mm 厚,从各类肉中随机取出两块,采用宰后直接注水法注入其质量 2%~10% 的蒸馏水,并做好标记,打乱顺序后进行测试。重复 3 次。设定合格肉的特征半波 δ_0 的幅值 4.010 V 为阈值, δ_0 幅值小于该值的肉即为注水肉。

测试结果表明(表 3),装置正确率平均值为 98.8%。由于噪音无法完全避免,所以存在漏判或误判,以 3 次检测的结果作为根据,判断正确率达 100%。

表 3 分级测试结果

Table 3 Statistics of grading test result

肉类	第 1 次		第 2 次		第 3 次	
	正确 数/个	正确 率/%	正确 数/个	正确 率/%	正确 数/个	正确 率/%
牛	10	100	10	100	10	100
羊	10	100	10	100	9	90
猪	10	100	10	100	10	100

4 结论

本研究依据超声波穿过含率不同的肉质时能量具有差异性的原理,设计了以 MSP430 为控制器,具有便携、快捷等优点的注水肉无损检测装置。以牛、羊、猪肉为试验对象

系生活中常见的肉类食品,具有较强的实用性,探究表征超声波能量吸收差异的特征量。发现特征半波的频率和肉质含水率的相关性微弱,而特征半波的幅值与含水率有很强的相关性,肉质含水率越高,对应的幅值越低,并确定特征半波的幅值阈值为 4.010 V。试验表明,在常温下,装置一次性检测的正确率达 98.8%。

由于本研究是针对市面上用宰后直接注水法制成的注水肉,所以该装置不一定能检测出用活禽灌水法和宰后血管注水法所制成的注水肉。后 2 种手段制成的注水肉的特点是注入的水多数存在于肉质的毛细血管中而不易向四周渗透,这与本研究注水肉内的水分分布特点有较大差异,所以后续试验中样品必须增加通过活禽灌水法和宰后血管注水法获得的注水肉,提高装置的识别能力和准确性。

参考文献

[1] 程灵豪,焦永亮.白肌肉、注水肉、注胶肉的鉴别检验方法[J].中国动物检疫,2015,32(4):28-31.

[2] 裴飞霸,张和华,尹军.生物电阻抗测量技术研究与应[J].中国医学物理学杂志,2015,32(2):238-234.

[3] 黄玉萍,陈桂云,夏建春,等.注水肉无损检测技术现状与发展趋势分[J].农业机械学报,2014,46(1):207-213.

[4] SIMAL S, BENEDTTO J, CLIEMENTE G, et al. Ultrasonic determination of the composition of a meat-based product[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 58(3): 253-257.

[5] HAZLRWOOD C F, NICHOLS B L. Evidence for the existence of a minimum of two phases so ordered water in skeletal muscle [J]. Nature, 1969, 222: 24-32.

[6] HAZLRWOOD C F, CHANG D C, NICLOLS B L, et al. Nuclear magnetic resonance transverse relaxation times of water protons inskeletal muscle[J]. Biophysical Journal, 1974, 14(8): 583-606.

[7] BERTRAM H C, ANDERSEN H J, KARLSSON A H. Comparative study of low-field NMRrelaxation measurements and two traditionalmethods in the determination of water holding capacity of pork[J]. Meat Science, 2001, 57(2): 125-132.

[8] 彭彦昆,张雷蕾.农畜产品品质安全高光谱无损检测技术进展和趋势[J].农业机械学报,2013,44(4):137-145.

[9] 张海云,彭彦昆,王伟,等.生鲜猪肉主要品质参数无损在线监测系统[J].农业机械学报,2013,44(4):146-151.

[10] 周正干,魏东.空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J].南昌航空大学学报,2007,21(3):96-100.

[11] 朱自强,喻波,密士文,等.超声波在混凝土中的衰减特征[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45(11):3900-3907.

[12] 曾伟,王海涛,田贵云,等.基于能量分析的激光超声波缺陷检测研究[J].仪器仪表学报,2014,35(3):650-655.

[13] 施德恒,陈玉科,孙金锋,等.激光超声技术及其在无损检测中的应用概况[J].激光杂志,2004,25(5):1-4.

[14] 郎玉苗,沙坤,李海鹏,等.中国培育品种牛肉品质特性比较分析[J].肉类研究,2013(5):31-35.

[15] 张春晖,李侠,李银,等.低温高湿变温解冻提高羊肉的品质[J].农业工程学报,2013,29(6):267-273.

[16] 范才成,余翔.猪肉肉质特性研究综述[J].长江大学学报,2011,8(11):252-257.