

# 基于数据可视化的冷鲜羊肉 TPA 指标数据提取优化方法

张国祥<sup>1</sup> 张海瑜<sup>2</sup> 李鑫星<sup>1,3</sup>

(1. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083; 2. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670;

3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 冷鲜羊肉的消费量近年呈现持续增长趋势, 保障其质量安全至关重要。全质构分析法(TPA)是冷鲜羊肉质量安全检测的重要方法, 但在实际检测过程中获取的部分 TPA 指标数据存在较大误差。通过解析冷鲜羊肉的 TPA 质构检测过程, 提出了一种基于数据可视化的冷鲜羊肉 TPA 指标数据提取优化方法。首先对实际检测力度数据进行滑动平均滤波处理, 在数据可视化方法基础上, 分别进行 TPA 曲线对应各特征节点的具体定位, 构建 TPA 指标数据提取优化模型, 设计了自主检测系统, 并进行了试验检测。结果表明, 基于优化方法设计组装的冷鲜羊肉 TPA 质构检测系统比 TA-XT PLUS 型质构仪表现出数据稳定的优势, 其中粘性指标数据平均测量误差下降 12.4 个百分点, 获得的 TPA 指标数据与样品菌落总数指标对数值表现出较高的相关性, 其相关系数绝对值均大于 0.8, 能够较好地反映试验期间冷鲜羊肉样品的质地特性变化。

**关键词:** 冷鲜羊肉; 全质构分析法; 数据可视化; 指标数据提取优化; 检测系统

中图分类号: TS251.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0343-08

OSID:



## Optimization Method of TPA Index Data Extraction of Chilled Mutton Based on Data Visualization

ZHANG Guoxiang<sup>1</sup> ZHANG Haiyu<sup>2</sup> LI Xinxing<sup>1,3</sup>

(1. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Yantai Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the improvement of people's living standard and the rapid development of modern food industry, food quality and safety issues attracted increasing attention. The consumption of chilled mutton showed a trend of continuous growth in recent years. Chilled mutton has become the main sales category of lamb products in China, and it is important to ensure its quality and safety. Texture profile analysis (TPA) is an important detection method for the quality and safety of chilled mutton, but there is a large data error in some TPA index values obtained during the actual measurement process. Based on the analysis of the specific measurement process of the TPA texture detection of chilled mutton, an optimizing method of TPA index extraction of chilled mutton was proposed. The actual force data was processed by the moving average filtering method, and on the basis of the data visualization method, the location of the characteristic nodes of the TPA curve was determined by constructing the TPA indexes extract optimization model. Based on the optimization method, the self-designed chilled mutton TPA detection system showed the data stability advantages, compared with the TA-XT PLUS tester, the average measurement error of adhesiveness was decreased by 12.4 percentage points. And all TPA indexes of the self-designed system showed a higher correlation with total bacteria, the absolute values of the correlation coefficient were over 0.8, which can better reflect the texture characteristics change of chilled mutton. The research result can provide more comprehensive theoretical support and practical experience for the TPA of chilled mutton, which can further improve the quality and safety of chilled mutton, so as to protect the rights of consumers.

**Key words:** chilled mutton; texture profile analysis; data visualization; optimization of index data extraction; detection system

收稿日期: 2021-04-19 修回日期: 2021-05-09

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-38)

作者简介: 张国祥(1994—), 男, 博士后, 主要从事农业装备与机械化工程研究, E-mail: zhangguoxiang@cau.edu.cn

通信作者: 张海瑜(1986—), 女, 讲师, 主要从事知识图谱技术与应用、信息与数据可视化等研究, E-mail: zhanghaiyu@cau.edu.cn

## 0 引言

随着人们生活水平的提高和现代食品产业的快速发展,食品质量安全问题越来越受到关注<sup>[1-3]</sup>。近年来,冷鲜羊肉(冷却羊肉)因其良好的食用品质而逐渐取代冷冻羊肉<sup>[4]</sup>。但是,冷鲜羊肉在生产、加工、储运以及销售过程中存在腐败变质的可能性,极易因加工和贮藏环境的细微变化而导致羊肉理化特性变化和微生物生长繁殖速率加快,进而致使肉品迅速发生腐败变质<sup>[5]</sup>。

全质构分析法(Texture profile analysis, TPA)是冷鲜羊肉质量安全检测的重要方法,具有检测效率高、综合检测能力强等优点<sup>[6]</sup>。在冷鲜羊肉组织劣变过程中,其肌肉组织在蛋白酶和微生物作用下进一步分解,肌纤维发生断裂<sup>[7]</sup>,使其整体结构变得松软,冷鲜羊肉样品表面出现具有粘性的蛋白胨和蛋白脲<sup>[8]</sup>。这些质地特征变化可以被人类感官所感知,同样也可以使用专业质构仪进行 TPA 质构检测,通过准确客观的 TPA 指标数据进行综合量化表达<sup>[9]</sup>。与剪切力测试、单次压缩等质构检测模式相比,质构仪在 TPA 模式下利用数据可视化方法形成的力度-时间曲线(TPA 曲线)包含了更全面的样品质地信息,在科学研究和实际应用中得到广泛认可<sup>[10-12]</sup>。

与国外相比,由于冷藏技术和消费者偏好的差异,国内冷鲜羊肉生产和消费尚处于发展初期阶段。与部分果蔬、奶酪等简单均质食品相比,冷鲜羊肉具有更加复杂的内部结构和外表面特征,而国内与其相关的 TPA 质构检测研究相对薄弱<sup>[13-14]</sup>。在冷鲜羊肉 TPA 质构检测过程中,由于测量仪器及其安装和测量方法等因素的综合影响,检测系统生成的实际 TPA 曲线与理想曲线差别较大,存在部分异常峰值和较为明显的曲线波动,由此造成仪器检测系统对 TPA 曲线特征节点的选择产生歧义和偏差,进而导致获取的部分 TPA 指标数据存在较大的误差<sup>[15]</sup>。

本文以市售冷鲜羊肉为研究对象,通过解析冷鲜羊肉的 TPA 质构检测过程,验证其测量机理,分别进行 TPA 曲线对应各特征节点的具体定位,提出基于数据可视化的冷鲜羊肉 TPA 指标数据提取优化方法,在此基础上设计相应的自主检测系统,并进行试验检测,以证明优化方法的合理性。

## 1 TPA 质构检测

TPA 质构测量时的样品质地信息获取主要包括力度数值实时采集、数据可视化处理及指标数据提

取等主要步骤,而 20 世纪 80 年代便开始利用计算机技术实现测量步骤的自动化处理<sup>[16-17]</sup>。借助计算机辅助系统,从利用数据可视化方法生成的 TPA 曲线中自动分析提取所需的指标数据已成为目前 TPA 质构测量的常规方法。如图 1 所示,本文使用 TA-XT PLUS 型质构仪对冷鲜羊肉样品进行 TPA 质构检测时,固接有力度传感器的探头对样品进行两次循环往复的按压过程,期间检测系统借助数据可视化方法形成实时的 TPA 曲线。

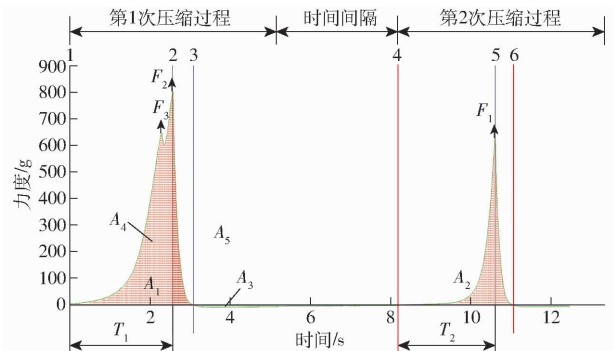


图1 TA-XT PLUS 型质构仪输出的冷鲜羊肉 TPA 曲线

Fig.1 TPA curve of chilled mutton output by TA-XT PLUS texture analyzer

通过进一步分析获得的 TPA 曲线可以提取所需冷鲜羊肉检测样品的 6 个质地特性指标,分别为硬度(Hardness)、弹性(Springiness)、内聚性(Cohesiveness)、粘性(Adhesiveness)、回复性(Resilience)和咀嚼性(Chewiness),其具体解释定义如表 1 所示<sup>[18-19]</sup>。

表 1 TPA 指标的具体解释定义

Tab.1 Specific interpretation definition of TPA index

名称	指标的具体解释定义
硬度	第 1 次压缩时的最大载荷,大多出现在样品最大变形处
弹性	反映样品经过第 1 次压缩以后能够再恢复的程度
内聚性	表示测试样品经过第 1 次压缩变形后所表现出来的对第 2 次压缩的相对抵抗能力
粘性	反映探头测试样品的粘着作用所消耗的功
回复性	表示样品在第 1 次压缩过程中回弹的能力,是第 1 次压缩和返回过程中返回时的样品所释放的弹性能与压缩时的探头耗能之比
咀嚼性	用于描述固态检测样品的测试咀嚼状态

结合图 1 和表 1 可知,TA-XT PLUS 型质构仪的 TPA 质构检测系统识别出具体的 6 个曲线特征节点位置,并以此计算所需的曲线参数。而各个 TPA 指标数值均可以通过峰值点、峰值面积以及压缩时间等 TPA 曲线参数予以充分表达,再经过相应的公式换算后,可以得到测量 TPA 指标具体计算方法:硬度为  $F_2$ ,弹性为  $T_2/T_1$ ,内聚性为  $A_2/A_1$ ,粘性

为  $A_3$ , 回复性为  $A_5/A_4$ , 咀嚼性为内聚性、硬度和弹性的乘积<sup>[19-20]</sup>。因此, 通过确定曲线特征节点位置, 获得相应的 TPA 曲线参数值, 通过进一步计算即可得到反映冷鲜羊肉检测样品质地特性的 TPA 指标数值。

但是在实际的冷鲜羊肉 TPA 质构检测过程中, 质构仪器由于受到仪器轻微震动、测量条件设置不合理、人员操作误差等因素的综合影响, 其检测系统生成的 TPA 曲线会存在异常峰值和明显的曲线波动, 使得检测系统对于 TPA 曲线特征节点的选择产生偏差, 影响具体的 TPA 曲线参数, 最终导致系统提取的部分 TPA 指标数值存在较大的数据误差<sup>[15, 21]</sup>。因此, 本文提出了一种基于数据可视化的冷鲜羊肉 TPA 指标数据提取优化方法。

## 2 TPA 指标数据提取优化方法

通过对实际检测力度数据进行滑动平均滤波处理, 消减曲线波动对 TPA 指标数据提取的影响, 并通过对 TPA 曲线上各个特征节点的具体位置、标志意义以及影响曲线参数进行分析, 在数据可视化方法基础上, 分别进行 TPA 曲线对应的各个特征节点具体定位, 构建 TPA 指标数据提取优化模型。在模型方法研究基础上, 结合现有 TA-XT PLUS 型质构仪工作原理, 自主设计并组装了一套冷鲜羊肉 TPA 质构检测系统, 生成的 TPA 曲线及其特征节点位置情况如图 2 所示。

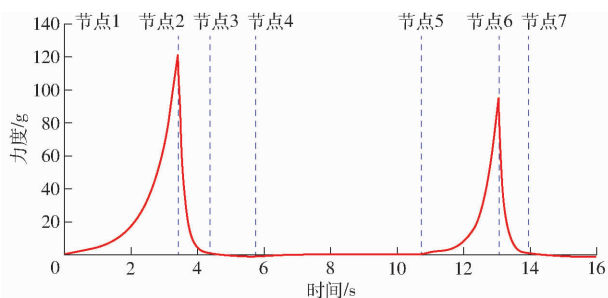


图2 自主检测系统输出的 TPA 曲线及其特征节点选择情况

Fig. 2 TPA curve output by self-designed detection system and its characteristic nodes selection

如图 2 所示, 在所设计的基于数据可视化的 TPA 指标数据提取优化方法中, 使用压头部件对冷鲜羊肉样品两次循环往复按压, 力度传感器检测 TPA 质构检测过程中的样品受力情况, 借助数据可视化方法形成实时的 TPA 曲线。所构建 TPA 指标数据提取优化模型将特征节点 4 按照计算不同 TPA 指标数值的需要拆分为新的节点 4 和节点 5, 在对利用数据可视化方法形成 TPA 曲线进行特征节点定位方面, 除了对波峰和波谷等曲线特征进行识别

外, 增加了更多压头行程距离和行程时间的计算<sup>[15]</sup>, 完成对 7 个曲线特征节点的自动识别。完整的 TPA 曲线可以用检测力度与时间的函数方程表达, 即

$$y = F(t) \quad (1)$$

首先利用预设值找到整体 TPA 曲线的起始位置, 确定起始时间  $t_0$ , 然后对 TPA 曲线进行滑动平均滤波处理, 以消减曲线波动带来的数据误差<sup>[22]</sup>, 其基本原理为

$$f(t) = \frac{\sum_{i=1}^n (F(t-i) + F(t+i)) + F(t)}{2n+1} \quad (2)$$

式中  $f(t)$ —— $t$  时刻的滤波结果,  $g$

$t$ ——压头测试时的行程时间,  $s$

$n$ ——滑动窗口半径

如式(2)所示, 通过设定一个宽度固定的滑动窗口, 该窗口沿着时间序列滑动, 同时提取窗内检测力度数据的算术平均值作为输出值, 形成滤波后的检测力度和时间的 TPA 曲线, 其各个特征节点对应的测试时间节点随着特征节点编号依次增大, 其检测到的实时力度满足的函数关系可以表达为

$$y_m = f(t_m) \quad (3)$$

式中  $y_m$ ——实时检测力度,  $g$

$t_m$ ——特征节点  $m$  对应的测试时间节点,  $s$

如图 2 所示, 特征节点 1 处于完整 TPA 曲线的最前端, 代表压头到达冷鲜羊肉样品表面, 样品开始受力压缩, 检测力度稳定增加, 因此研究同样采用设定定量预压力度的方式确定特征节点 1, 并以此确定压头从复位高度  $H$  (距样品托盘高度) 到达冷鲜羊肉样品表面的位移  $S_1$  和测试时间节点  $t_1$ , 公式为

$$y_1 = f(t_1) = F_D \quad (4)$$

式中  $F_D$ ——事先人工输入的定量预压力度,  $g$

特征节点 2 处于第 1 次压缩形成的循环正值峰的峰顶点, 第 1 次压缩过程中的探头实时感知力达到最大, 依据设定的压缩比  $p$  计算获得其压头到达预定位置所需的行程时间  $t'_2$ , 公式为

$$t'_2 = t_1 + \frac{S(p)}{v} = t_1 + \frac{(H - S_1)p}{v} \quad (5)$$

式中  $S$ ——压头测试时的行程距离,  $mm$

$v$ ——系统设定的压头运行测量速度,  $mm/s$

以得到的行程时间  $t'_2$  为基准, 取前后固定时间 (0.25 s) 范围的最大值为特征节点 2 对应的检测力度  $y_2$ , 并确定其对应时间节点  $t_2$ , 公式为

$$y_2 = f(t_2) = \operatorname{argmax}\{f(t'_2 - 0.25), f(t'_2 + 0.25)\} \quad (6)$$

同样参考行程时间  $t'_2$  可以确定压头返回至冷

鲜羊肉样品表面所需的时间,确定特征节点4所对应的测量时间节点 $t_4$ 并确定其实时检测力度 $f(t_4)$ ,公式为

$$y_4 = f(t_4) \quad (7)$$

其中

$$t_4 = 2t_2' - t_1 \quad (8)$$

特征节点4处于第1次压缩过程中的循环负值峰的末端点,代表第1次压缩过程结束,而特征节点3是第1次压缩过程的循环正值峰末端点,其探头实时感知力为零,因此是处于 $t_2$ 和 $t_4$ 之间零值点,公式为

$$y_3 = f(t_3) = 0 \quad (9)$$

特征节点5是第2次压缩过程的循环正值峰前端点,标志第2次压缩过程开始,依据设定的两次循环压缩的间隔时间 $t_D$ 得以确定,公式为

$$y_5 = f(t_5) \quad (10)$$

其中

$$t_5 = t_4 + t_D \quad (11)$$

特征节点6是第2次压缩过程的循环正值峰峰值点,代表第2次压缩探头实时感知力达到最大,其计算方法与特征节点2相一致,在获得压头行程时间 $t_6'$ 基础上,计算得到时间节点 $t_6$ 并确定其实时检测力度 $f(t_6)$ ,公式为

$$t_6' = t_5 + t_2' - t_1 \quad (12)$$

$$y_6 = f(t_6) = \operatorname{argmax} \{f(t_6' - 0.25), f(t_6' + 0.25)\} \quad (13)$$

特征节点7是完整TPA曲线最末端点,代表TPA质构测量的结束,探头完全脱离样品表面,其计算方法与特征节点3相一致,为曲线末端的零值点,公式为

$$y_7 = f(t_7) = 0 \quad (14)$$

由此,研究得到具体的冷鲜羊肉TPA指标数据提取优化模型,借助程序语言可以在自主设计组装的冷鲜羊肉TPA质构检测系统上加以实现,且可以精准地确定曲线上的7个特征节点位置,减少数据误差的影响,提高TPA指标数据的稳定性和可靠性。

### 3 冷鲜羊肉TPA质构检测系统设计与试验

本文自主设计组装的冷鲜羊肉TPA质构检测系统,主要包括检测硬件和上位机软件两个主要组成部分。由检测硬件部分完成冷鲜羊肉样品的TPA质构测量环节,采集的数据信息最终被传输至PC端的上位机软件中,依据相应的检测算法和数据模型,生成相应的冷鲜羊肉样品TPA质构检测结果,通过模拟界面的形式进行展现。

#### 3.1 硬件设计

冷鲜羊肉TPA质构检测系统的检测硬件主要

由结构框架、直线导轨、压头等机械结构部件和下位机控制系统组成,如图3所示。

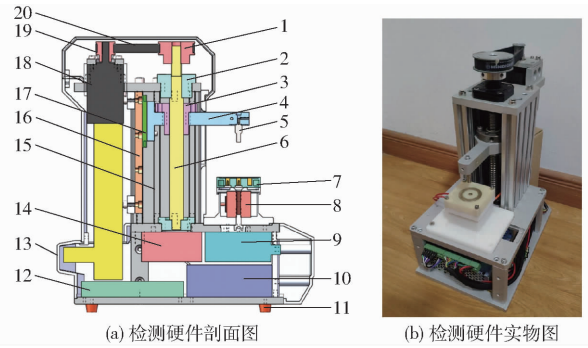


图3 检测系统的硬件总体结构图

Fig. 3 Hardware of self-designed detection system

1. 从动带轮 2. 丝杠轴承座 3. 丝杠螺母 4. 压杆 5. 压头
6. 丝杠 7. 承载台 8. 力度传感器 9. 步进电机驱动器 10. 开关电源 11. 橡胶支座 12. 控制电路板 13. 硬件外壳 14. 力度数据变送器 15. 结构框架 16. 直线导轨 17. 固接滑块
18. 步进电机 19. 驱动带轮 20. 同步带

检测硬件的整体高度约为330 mm,质量约为5 kg,主体框架采用铝合金材质,承载台采用硬质绝缘的3D打印树脂材料,用于施加TPA质构检测作用力的压头采用不锈钢材质。

#### 3.1.1 机械结构设计

检测系统进行TPA质构检测工作时,步进电机通过驱动带轮、同步带和从动带轮带动丝杠转动,配套丝杠螺母带动压杆沿直线导轨上下移动,固接在压杆端部的压头对放在承载台上的冷鲜羊肉样品进行施压作业<sup>[23-24]</sup>。传递动力采用的丝杠部件自主设计完成,其具体尺寸参数如图4所示。

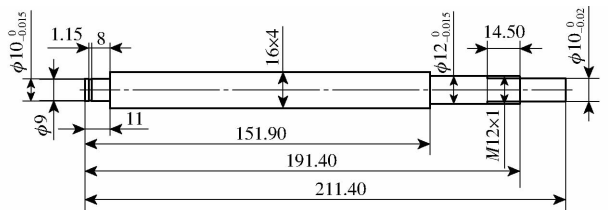


图4 丝杠部件的具体尺寸参数

Fig. 4 Specific size parameters of screw components

相比较现有质构仪在悬梁部位放置力度传感器,自主检测系统的力度传感器及其附件置于承载台下方,降低重心高度,提高整体硬件结构的稳定性,同时也不改变其受力变化,如图5所示。

进行冷鲜羊肉样品的TPA质构检测时,放置好冷鲜羊肉样品后,将承载台、受力承台及检测肉块视为统一整体进行受力分析,其重力为 $G$ , $F_N$ 为非接触状态下的支撑力, $F_4$ 为下压过程中压头施加作用力, $F_5$ 为上拉过程中压头受到的肉块粘附拉力,由于作用力与反作用力大小相等,在系统检测过程中,压头受到的反作用力和承载台内置的力度传感器受到力

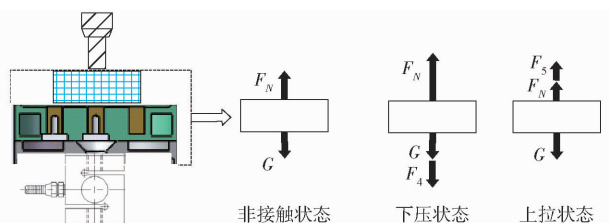


图5 检测过程中力度传感器受力分析

Fig. 5 Force analysis of force sensor during measurement

度变化在数值上相等。因此,相比较 TA-XT PLUS 型质构仪在悬梁部位放置力度传感器,将力度传感器放在承载台下部,所采集的力度数据并没有区别。

### 3.1.2 下位机控制系统

根据实际工作要求及所用到的检测机械结构设计下位机控制系统,如图6所示,主要包括 STM32 控制板、压头运动单元、力度数据采集单元和外部按键4部分。

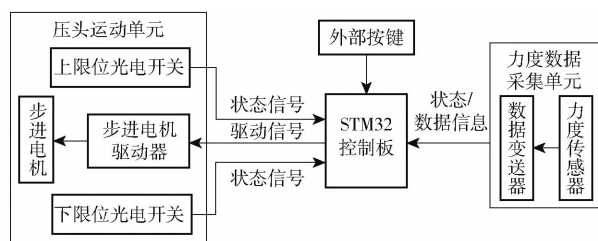


图6 下位机控制电路系统框图

Fig. 6 Diagram of control circuit system of lower computer

其中,步进电机驱动器接收来自 STM32 控制板的控制信号,根据信号驱动步进电机完成转动、停止等动作,上限位光电开关和下限位光电开关用于测量压头的上、下极限位置,起到保护作用。外部按键用于操作人员直接控制检测硬件,并可以在发生故障时紧急停止检测硬件运行。

力度数据采集单元由力度传感器和数据变送器组成,当压头对冷鲜羊肉样品施压时,力度传感器的内部应变片受力发生变化,导致其实时阻值发生改变,通过相应的检测电路把阻值变化转化为电信号,由数据变送器采集并进行 AD 转换后发送至 STM32 控制板。检测系统所采用的力度传感器为蚌埠恒远传感器科技有限公司生产的 HYL-011 型号的 S 型磁敏传感器,其量程为 1 ~ 50 kg。

检测硬件的下位机控制系统根据硬件的工作流程以及工作过程中各传感器的反馈信号,对 TPA 质构检测硬件单元进行驱动和控制。下位机控制系统主要分为 4 个模块:初始化模块、参数设定模块、校准模块和测量模块。

初始化模块包括通用输入与输出 (General-purpose input/output, GPIO) 初始化、定时器初始化、串口初始化等。系统初始化首先对系统使用的 GPIO 进行配置,再进行串口初始化(波特率为

115200 b/s、8 位数据位、1 位停止位、无奇偶校验),然后进行定时器初始化。

下位机控制系统共使用两个定时器,定时器 2 用于产生 1 ms 定时时间,主要用于系统中的定时操作。定时器 3 用于产生步进电机脉冲,步进电机脉冲频率  $f_2$  需根据压头的运动速度  $v$ 、丝杠导程  $s$ 、电机驱动器细分分数  $B$  以及同步带传动的减速比  $\lambda$  进行确定,公式为

$$f_2 = \frac{v}{s\lambda} B \quad (15)$$

其中,电机驱动器细分分数  $B = 2000$ ,减速比  $\lambda = 1/3$ ,丝杠导程  $s$  为 4 mm,因而定时器 3 的定时时间  $T_3$  计算公式为

$$T_3 = \frac{1}{2f_2} \quad (16)$$

参数设置模块通过串口接收来自上位机软件的设置指令,对 TPA 质构测量过程中的关键参数进行设置,包括测前速度、测试速度、测后速度、压缩比、预设力和压头复位高度等具体参数。

校准模块主要用于 TPA 质构检测单元的校准,以减少系统误差对测量结果的影响。在 TPA 质构检测前,在样品托盘上放置已知质量的砝码对力度传感器进行力度校准,通过空载测试(压头施加力度大于预设力)后,压头回到复位高度,进行 TPA 质构检测单元的高度位置校准。

测量模块主要用于控制 TPA 质构具体检测过程。其中,下位机控制系统控制压头对样品进行两次循环往复的按压过程,同时实时采集力度传感器上的压力数据,并通过串口发送至上位机软件进行数据处理,TPA 质构检测的控制流程如图 7 所示,其中,A、B 分别表示串口接收模块和串口发送模块。

除此之外,在进行冷鲜羊肉的 TPA 质构检测过程中,检测系统全程监测硬件的异常情况,包括力度传感器数据大小和压头运动状态,当力度传感器数据接近其量程时,立即停止压头运动并控制压头向上运动至复位高度同时进行故障报警;当压头运动到上部或者下部极限位置时,立即停止压头运动并进行故障报警,以防止损坏硬件结构部件。

### 3.2 软件设计

上位机软件采用 C++ 语言编写,上位机软件通过两个串口分别与检测硬件中的下位机控制系统进行通讯,选择对应的串口号并打开口,系统即开始运行。如图 8 所示,在冷鲜羊肉样品的 TPA 质构检测过程中,操作人员在上位机软件系统界面的操作区完成 TPA 相关测量参数的设定,控制下位机控

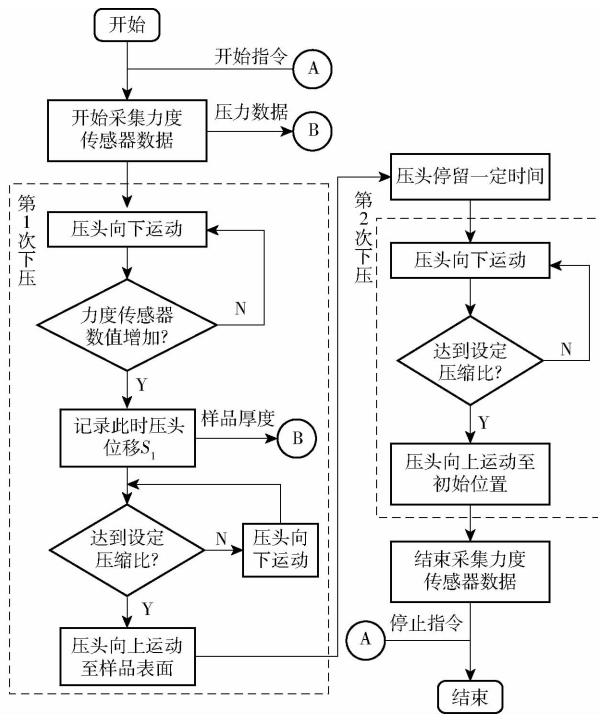


图7 自主检测系统的TPA质构检测控制流程图

Fig.7 TPA measurement flowchart of self-designed detection system

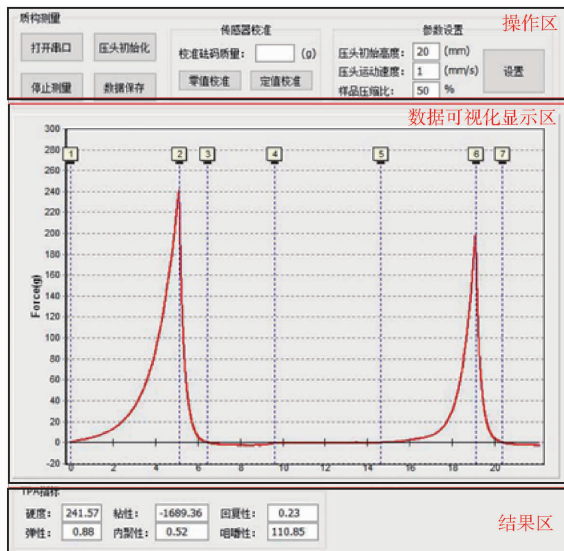


图8 自主检测系统的上位机软件界面

Fig.8 Upper computer software interface of self-designed detection system

制系统实时采集力度传感器的压力数据并通过串口发送至上位机软件所在的PC端,上位机软件通过内部的检测算法和数据模型完成压力数据信息的数据可视化处理,在软件界面的数据可视化显示区生成所需的TPA曲线,并在结果区展现具体的TPA指标数值。在所设计TPA指标数据提取优化方法的系统实现上,本文采用定时器和行程计算相结合的方式,自动识别确定特征节点的位置,并自动计算提取所涉及的曲线参数和具体TPA指标数值<sup>[25]</sup>。

从图8可以看出,所设计的冷鲜羊肉TPA质构自主检测系统能够较完整地展现冷鲜羊肉TPA质构检测中的曲线特征变化,并对其曲线特征节点实现有效识别。采用TA-XT PLUS型质构仪和自主检测系统两种检测方式对比试验进一步验证优化方法的实际检测效果。

### 3.3 试验和结果分析

试验选用冷鲜羊肉取样于北京地区的“菜鲜果美”超市,为当日从屠宰厂总部内库发往销售点超市的草原羔羊冷鲜里脊肉,依据GB 20799—2016《食品安全国家标准 肉和肉制品经营卫生规范》要求保存在0~4℃的环境温度下,总体质量约为90 kg,在低温运输携带条件下从超市运入实验室0℃冷藏恒温箱中。试验测量时采用专业的切取装置沿着肉样纤维方向切割制取厚度均匀的标准圆状冷鲜羊肉样品,样品截面面积为10 cm<sup>2</sup>,厚度为10~15 mm,质量控制在10 g左右,试验周期在预试验基础上确定为6 d<sup>[26-27]</sup>。

将自主检测系统和TA-XT PLUS型质构仪采用相同的测量参数设定,通过参考文献[28-29]冷鲜肉类进行TPA质构测量,采用的设定参数包括:预压力5 g,试验使用探头为P/5平底柱形探头,第1次压缩及第2次压缩之间的恢复时间间隔为5 s,采用较慢的测试速度以更充分反映样品内部组织状态的变化,测前、测中和测后速度均设置为1.00 mm/s,选用50%的压缩比测试条件<sup>[30-31]</sup>。在实际测量前对质构仪进行必要的力量校核和高度校核,确定冷鲜羊肉样品测定空气温度为26℃,环境相对湿度为25%。同时依据我国现行的冷鲜羊肉质量安全检验相关的国家及行业标准,研究选定菌落总数作为其品质变化的参考评价指标,以更加全面反映试验期间冷鲜羊肉的品质劣变过程。所涉及的试验仪器(包括微量天平、恒温箱、台式振荡器等)和具体测量方法均按照GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》执行。

为期6 d的样品测试试验期间,每天定点定时从0℃冷藏恒温箱中取出冷鲜羊肉样品,分别采用自主检测系统和TA-XT PLUS型质构仪利用五点取样法完成3个平行冷鲜羊肉样品的TPA指标测取,以及3个平行冷鲜羊肉样品的菌落总数指标数据测取,取其平均值作为测量值。以购置当天的冷鲜羊肉样品测试结果为例,计算获得每个单点测得的TPA指标数据和测量值的相对变化量,再进行加和求平均,获得两种检测方式对于单个样品的测量误差,再计算3个样品的平均测量误差 $\bar{E}$ ,作为两种检测方式的TPA指标数据稳定性

的性能评估指标。对两种检测方式的各个 TPA 指标数据稳定性结果进行统计,结果如图 9 所示。

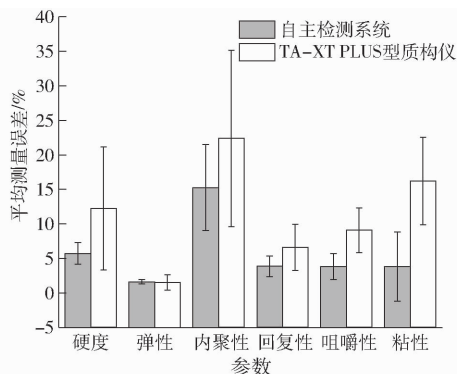


图 9 自主检测系统和 TA-XT PLUS 型质构仪的 TPA 指标数据稳定性结果对比

Fig. 9 Comparison of measurement stability of self-designed detection system and TA-XT PLUS texture analyzer

由图 9 可知,自主设计实现的检测系统相比较 TA-XT PLUS 型质构仪,TPA 指标数据的稳定性有所提升。除弹性指标的平均测量误差均保持在 1.5% 以外,基于 TPA 指标优化方法所设计实现的自主检测系统获得的 TPA 指标数据的平均测量误差及数据标准差相比较前述测量使用的 TA-XT PLUS 型质构仪均有明显降低,其中最为显著的粘性指标平均测量误差下降 12.4 个百分点。

为进一步验证基于优化方法所设计的自主系统的可行性,借助冷鲜羊肉劣变期间的 TPA 质构指标数据和菌落总数生物指标特征变化的内部联系<sup>[25]</sup>,采用皮尔逊相关系数  $r$  描述自主系统测定 TPA 质构指标和菌落总数参考评价指标之间的关联程度<sup>[12]</sup>。皮尔逊相关系数  $r$  的取值范围为  $-1 \sim 1$ ,其绝对相关系数  $|r|$  值越接近 1,说明两变

量之间的线性相关的密切程度越高,越接近 0 则说明密切程度越低。自主系统测得的硬度、弹性、内聚性、回复性、咀嚼性和粘性与菌落总数对数值指标的相关系数结果分别为 0.825、-0.941、-0.837、0.870、0.815 和 0.840。由此可知,自主检测系统获得的 TPA 指标数据与冷鲜羊肉样本菌落总数对数值具有较好的相关性,其相关系数绝对值均大于 0.8,能够较为充分地反映冷鲜羊肉的贮藏试验期间的质地特性变化。

综上所述,基于优化方法自主设计实现的冷鲜羊肉 TPA 质构检测系统所获取的 TPA 指标数据表现出较良好的稳定性和可靠性。试验结果也进一步验证了所提出的基于数据可视化的冷鲜羊肉 TPA 指标数据提取优化方法的可行性和优势。

## 4 结论

(1)通过解析冷鲜羊肉的 TPA 质构检测过程,在数据可视化方法基础上,提出了一种基于数据可视化的冷鲜羊肉 TPA 指标数据提取优化方法。构建了 TPA 指标数据提取优化模型,分别进行 TPA 曲线对应各特征节点的具体定位,设计相应的自主检测系统,并进行了试验检测。

(2)基于优化方法自主设计的检测系统相比于试验质构仪器,其 TPA 指标数据的稳定性有所提升,其中最为显著的粘性指标数据平均测量误差下降 12.4 个百分点。

(3)自主检测系统获得的 TPA 指标数据与冷鲜羊肉样本菌落总数对数值表现出较高的相关性,其相关系数绝对值均大于 0.8,能够充分反映冷鲜羊肉在贮藏试验期间的质地特性变化。

## 参 考 文 献

- [1] HU K, LIU J, LI B, et al. Global research trends in food safety in agriculture and industry from 1991 to 2018: a data-driven analysis[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 85: 262 - 276.
- [2] 陈瑛,陈昂轩,董玉博,等. 基于 LSTM 的食品安全自动问答系统方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 380 - 384.  
CHEN Ying, CHEN Angxuan, DONG Yubo, et al. Methods of food safety question answering system based on LSTM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 380 - 384. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2019s058&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s058&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.058. (in Chinese)
- [3] WACŁAW L, HANNA G W, OLENA K. Meat, meat products and seafood as sources of energy and nutrients in the average polish diet[J]. Nutrients, 2018, 10(10):1412.
- [4] KANATT S R, CHANDER R, SHARMA A. Effect of radiation processing on the quality of chilled meat products[J]. Meat Science, 2005, 69(2): 269 - 275.
- [5] 孙丹丹,卢士玲,李开雄,等. 贮藏温度对冷鲜羊肉微生物菌群生长变化的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 327 - 331.  
SUN Dandan, LU Shiling, LI Kaixiong, et al. Effect of temperature on the quality and safety of chilled mutton[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(4): 327 - 331. (in Chinese)
- [6] KUMAR S, MENDIRATTA S K, AGRAWAL R K, et al. Quality evaluation of mutton nuggets incorporated with optimized level of flaxseed flour[J]. Nutrition & Food Science, 2017, 47(1):67 - 77.
- [7] 王政纲,赵丽华,苏琳,等. 冰温贮藏羊肉电阻抗特性及肉品质相关性分析[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 249 - 255.  
WANG Zhenggang, ZHAO Lihua, SU Lin, et al. Correlation analysis between electrical impedance and quality of mutton during

- controlled freezing-point storage[J]. Food Science, 2019, 40(1): 249–255. (in Chinese)
- [8] HU Yongjin, QIAO Jinling, ZHANG Xi, et al. Antimicrobial activity of *Magnolia officinalis* extracts in vitro and its effects on the preservation of chilled mutton[J]. Journal of Food Biochemistry, 2011, 35(2): 425–441.
- [9] TRUONG V D, DAUBERT C R, DRAKE M A, et al. Vane rheometry for textural characterization of cheddar cheeses; correlation with other instrumental and sensory measurements[J]. LWT—Food Science and Technology, 2002, 35(4): 305–314.
- [10] 齐红革, 谭亚军, 黄琳琳, 等. 食品安全数据分析可视化模型研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(17): 5968–5973.  
QI Hongge, TAN Yajun, HUANG Linlin, et al. Research on visualization model of food safety data analysis[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(17): 5968–5973. (in Chinese)
- [11] TSUJI S. Texture profile analysis of processed foods using the tensipresser and the multi-point mensuration method [J]. Journal of Texture Studies, 2010, 13(2): 135–186.
- [12] MADIETA E, SYMONEAUX R, MEHINAGIC E. Textural properties of fruit affected by experimental conditions in TPA tests: an RSM approach[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(5): 1044–1052.
- [13] 明建, 李洪军. 压缩比对嫩化牛肉物性值的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 45–48.  
MING Jian, LI Hongjun. Effects of compression rate on physical properties of tenderized beef[J]. Food Science, 2008, 29(11): 45–48. (in Chinese)
- [14] 郝红涛, 赵改名, 柳艳霞, 等. 肉类制品的质构特性及其研究进展[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 130–133.  
HAO Hongtao, ZHAO Gaiming, LIU Yanxia, et al. The texture characteristics and advances of meat products[J]. Food & Machinery, 2009, 25(3): 130–133. (in Chinese)
- [15] 冯峰. 胡萝卜的流变特性及质地评价研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.  
FENG Feng. Studies on rheological properties and texture evaluation of carrot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. (in Chinese)
- [16] 朱丹实, 李慧, 曹雪慧, 等. 质构仪器分析在生鲜食品品质评价中的研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(7): 264–269.  
ZHU Danshi, LI Hui, CAO Xuehui, et al. Research progress in quality evaluation of fresh foods by texture analyzers[J]. Food Science, 2014, 35(7): 264–269. (in Chinese)
- [17] ALINA S S, PHILIP R H, HARRY W B. Behavior of different foods in the standard shear compression cell of the shear press and the effect of sample weight on peak area and maximum force[J]. Journal of Texture Studies, 1970, 1(3): 356–378.
- [18] BOURNE M C, KENNY J F, BARNARD J. Computer-assisted readout of data from texture profile analysis curves[J]. Journal of Texture Studies, 1978, 9(4): 481–494.
- [19] 姜松, 林琳, 王海鸥, 等. 苹果整果 TPA 试验的研究[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2004, 25(3): 189–192.  
JIANG Song, LIN Lin, WANG Haiou, et al. Experimental study on whole apple's TPA[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2004, 25(3): 189–192. (in Chinese)
- [20] PHINNEY D M, FRELKA J C, WICKRAMASINGHE A, et al. Effect of freezing rate and microwave thawing on texture and microstructural properties of potato (*Solanum tuberosum*) [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(4): 933.
- [21] 翟洪稳, 范素芳, 王娟, 等. 测量不确定度在食品检验中的应用及进展[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 314–320.  
ZHAI Hongwen, FAN Sufang, WANG Juan, et al. Recent progress in measurement uncertainty and its application in food inspection and detection[J]. Food Science, 2021, 42(5): 314–320. (in Chinese)
- [22] 龚志文, 彭黔荣, 周明珠, 等. 微波法胶囊滤棒检测算法研究与装置设计[J]. 烟草科技, 2017, 50(10): 80–86.  
GONG Zhiwen, PENG Qianrong, ZHOU Mingzhu, et al. Algorithm and device for detecting capsuled-filter rod by microwave [J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(10): 80–86. (in Chinese)
- [23] 孙钟雷, 孙永海, 李宇, 等. 仿生食品质构仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 230–234.  
SUN Zhonglei, SUN Yonghai, LI Yu, et al. Design and experiment of bionic food texture analyzer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(1): 230–234. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120141&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120141&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.041. (in Chinese)
- [24] 陈莉, 孙永海, 刘晶晶, 等. 基于肌电信号的仿齿压头对食品质地的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 248–253.  
CHEN Li, SUN Yonghai, LIU Jingjing, et al. Influence of bionic indenter on food texture based on electromyographic signal [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 248–253. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140840&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140840&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.040. (in Chinese)
- [25] 张国祥. 面向冷鲜羊肉质量安全的 TPA 质构-阻抗复合检测方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.  
ZHANG Guoxiang. Research on composite detection method of texture profile analysis and impedance for the quality of chilled mutton [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [26] 朱东阳, 康壮丽, 王春彦, 等. 冷藏时间和温度对猪背最长肌品质的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 85–88.  
ZHU Dongyang, KANG Zhuangli, WANG Chunyan, et al. Effect of the time and temperature during cold storage on the quality of porcine longissimus dorsi[J]. The Food Industry, 2018, 39(7): 85–88. (in Chinese)
- [27] ZHANG G, HUANG X, FU Z, et al. Correlation between physical properties and freshness of chilled mutton in China[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(12): e14231.
- [28] 郭兴凤, 慕运动. 几种因素对肉制品质构测定结果的影响[J]. 食品工业科技, 2006, 27(5): 51–53.  
GUO Xingfeng, MU Yundong. The influence of several factors on the results of meat products texture measurement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2006, 27(5): 51–53. (in Chinese)
- [29] ROSENTHAL A J. Texture profile analysis—how important are the parameters? [J]. Journal of Texture Studies, 2010, 41(5): 672–684.
- [30] 张丽, 包高良, 孙宝忠, 等. 基于初始 pH 变化预测真空包装冷藏过程中的牦牛肉质构[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 324–328.  
ZHANG Li, BAO Gaoliang, SUN Baozhong, et al. Predicting texture properties of yak meat by the changing of pH value during cooling storage with vacuum packing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(5): 324–328. (in Chinese)
- [31] MORALES R, GUERRERO L, SERRA X, et al. Instrumental evaluation of defective texture in dry-cured hams[J]. Meat Science, 2007, 76(3): 536–542.