

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.045

基于电学特性的生鲜牛乳蛋白质含量检测仪研究

郭文川^{1,2} 刘振华¹ 朱新华¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了提供一种操作简单、成本低廉且便于现场检测的生鲜牛乳蛋白质含量检测仪器, 基于农业物料的电学特性设计了扫频范围为 1 ~ 100 MHz 的牛乳蛋白质含量检测仪。该检测仪的硬件系统由 STM32 单片机、扫频信号源模块、检测模块、信号处理模块和输入输出模块组成。基于 MDK 5.0 环境, 利用 C 语言开发了检测仪的软件, 主要实现系统初始化、频率扫描、数据采集、串口发送、按键处理和结果显示等功能。以生鲜牛乳为研究对象, 分析了蛋白质含量与 1 ~ 100 MHz 范围内 199 个采样点的输入、输出信号的幅值, 以及输入与输出信号相位差之间的关系, 基于采集的信号建立了牛乳蛋白质含量的偏最小二乘模型, 该模型决定系数为 0.835。对仪器检测精度进行了测试, 本检测仪蛋白质含量绝对测量误差范围为 -0.11 ~ 0.12 g/(100 g), 平均绝对测量误差为 0.01 g/(100 g), 检测时间小于 2 min, 可以快速、有效地检测生鲜牛乳中的蛋白质含量。

关键词: 生鲜牛乳; 蛋白质含量; 检测仪; 电参数; 单片机

中图分类号: S237 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)04-0387-07 **OSID:** 

Design of Protein Content Detector for Raw Milk Based on Electrical Properties

GUO Wenchuan^{1,2} LIU Zhenhua¹ ZHU Xinhua¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Protein content is one of the most important quality indicators of milk. The traditional methods used to measure the protein content of milk have the advantage of high precision, but the measurement procedures are tedious and time-consuming, and the measurement equipment are expensive. In addition, these methods cannot be used in filed or in-suit. Therefore, developing a kind of portable milk protein content detector which is simple in operation and low in cost, and could be used in-suit measurement, will be appreciated by milk producers, processors and consumers. Since the values of electric parameters of milk are affected by protein content, a portable protein content detector over the frequency range of 1 ~ 100 MHz was developed. The hardware of the detector consisted of a STM32 single chip microcomputer, a frequency sweep signal source module, a detection module, a signal processing module, and an input and output modules. The software, developed under the development environment of MDK 5.0 by using C language, realized the functions of initialization, frequency sweep, data sampling, serial port transmission, key processing and result display. Fresh raw milk were used as samples to analyze the relationship between the protein content and the obtained data, i. e., the amplitudes of input and output signals, and the phase difference between the input and output signals. The partial least squares model was established to predict the protein content based on obtained data. The results showed that the model had a determination coefficient of 0.835, the absolute measurement error of -0.11 ~ 0.12 g/(100 g), and the average absolute error of 0.01 g/(100 g). Moreover, the measurement could be realized in 2 min. The developed detector made the detection of protein content of fresh raw milk realized quickly and effectively.

Key words: fresh raw milk; protein content; detector; electrical properties; single chip microcomputer

收稿日期: 2019-08-15 修回日期: 2019-09-14
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31671935)
作者简介: 郭文川(1969—), 女, 教授, 主要从事农产品和食品品质无损检测技术研究, E-mail: guowenchuan69@126.com

0 引言

牛乳是最古老的天然饮品之一,其营养丰富且全面^[1]。蛋白质是牛乳的主要营养成分,常被乳品企业和消费者作为评价牛乳品质的重要指标。因此,蛋白质含量不仅决定了牛乳的市场价格,也对消费者的购买欲产生影响^[2]。国标规定的牛乳蛋白质含量检测方法有凯氏定氮法、分光光度法和燃烧法^[3]。虽然这几种方法具有检测精度高的优点,但操作复杂、费时费力,且无法用于现场检测^[4]。丹麦 FOSS 分析仪器公司开发的多功能乳品分析仪是目前大型乳品企业广泛使用的牛乳成分检测仪,该仪器精度高、检测迅速,但是其价格非常昂贵,且体积庞大,仅适用于实验室检测。开发一款成本低廉、操作简便、适于现场检测的牛乳蛋白质含量检测仪对指导牛乳销售、加工以及消费具有重要意义。

在电学上,食品和农产品都属于电介质,可等效于电阻与电容相串联或相并联的电路^[5]。大量的研究表明,电介质的电特性受物质的成分以及测试信号频率的影响。对于牛乳,其主要成分水^[6]、蛋白质^[7]、脂肪^[8]、乳糖^[9]、盐^[10]等均影响牛乳的介电特性。在对牛乳介电特性的研究方面,文献[11]研究了蛋白质含量对 10~4 500 MHz 范围内牛乳介电参数的影响,指出当频率小于 150 MHz 时,相对介电常数随蛋白质含量的增大而增大,而当频率大于 600 MHz 时,又随蛋白质含量的增大而减小。在整个测试频率范围内,介质损耗因数随蛋白质含量的增大而增大。这些均是基于昂贵的矢量网络分析仪开展的基础研究,仅限于实验室检测,无法应用于现场检测^[12-13]。

为此,基于牛乳的蛋白质对其介电参数产生影响的原理,本文开发一种便携式牛乳蛋白质含量检测仪,并对检测仪的性能进行测试,为牛乳的现场快速检测提供方案。

1 检测仪设计

1.1 检测原理

当将一平行极板浸没在牛乳中,且给极板施加一个交流信号时,该信号将选择对其阻碍最小的通路进行传导^[14-16]。在电路分析中,常将电介质简化为电阻 R 与电容 C 相串联或相并联的电路^[17]。如图 1 所示,若将其用串联形式等效,则等效电路的阻抗 Z_s 可以表示为

$$Z_s = R - j \frac{1}{\omega C}$$

式中 ω ——角频率

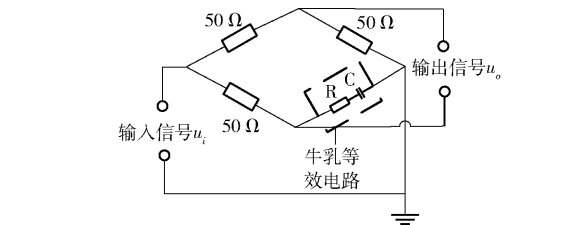


图 1 检测原理示意图

Fig. 1 Schematic of detection principle

牛乳样品中成分的变化会引起 Z_s 的变化。若将 Z_s 作为惠斯登电桥的一个臂,而其他 3 个臂的电阻相等,如阻值为 50 Ω。则当 $Z_s \neq 50 \Omega$ 时,电桥不平衡。由于牛乳中的蛋白质含量会影响其等效阻抗 Z_s 的变化,因此,当给该电桥输入一个交变信号 u_i ,则会产生一个输出信号 u_o (图 1),该信号的幅值和相位会随着牛乳中蛋白质含量的变化而变化。定义比值 Γ 为

$$\Gamma = \frac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i} = \frac{U_o \angle \Phi}{U_i}$$

式中 U_i ——电桥输入信号 u_i 的幅值, V
 U_o ——电桥输出信号 u_o 的幅值, V
 Φ —— u_o 与 u_i 的相位差, (°)

而 Γ 与牛乳等效电路的阻抗 Z_s 存在关系

$$Z_s = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} Z_0$$

式中 Z_0 为 50 Ω 的特性阻抗。由式(2)、(3)可知,牛乳的等效阻抗 Z_s 决定了 U_o 及 Φ ,反之,可根据 U_i 、 U_o 和 Φ 计算 Z_s 。由于 U_i 、 U_o 和 Φ 与牛乳的蛋白质含量及频率有关,因此,基于此设计一个扫描频率在 1~100 MHz 范围内的牛乳蛋白质含量检测仪。

1.2 硬件设计

图 2 是基于电学特性开发的牛乳蛋白质含量检测仪硬件结构图。该检测仪主要由单片机、扫频信号源模块、检测模块、信号处理模块和输入输出模块组成。单片机用于控制扫频信号源模块,并负责数据的采集和上传;扫频信号源用于产生一个频率为 1~100 MHz 的正弦波作为系统的激励信号;检测模块包含电桥以及与之相连接的平行极板,该模块用于

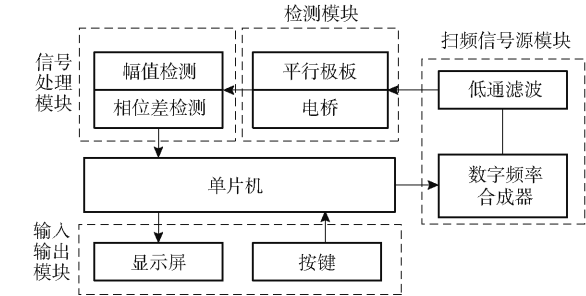


图 2 检测仪硬件结构框图

Fig. 2 Structure diagram of detector's hardware

将输入信号和受牛乳影响而产生的输出信号分离开;信号处理模块用于提取电桥的输入和输出信号的幅值及其相位差,并将这些信息转换为直流电压输送至单片机的采集端口。输入输出模块用于人机交互。

1.2.1 单片机

本设计采用 ARM Cortex - M3 内核的 32 位的 STM32F103C8T6 单片机作为核心控制器。该单片机有 20 KB 的 SRAM 和 64 KB 的 Flash, 2 个 12 位的同步 ADC 和 3 个 UART^[18]。时钟采用 8 MHz 的石英晶振,串口通信电路采用 RS232 - USB 接口转换器 PL2303 实现单片机与计算机的数据通信,复位电路包括上电复位和按键复位两种。

1.2.2 扫频信号源模块

扫频信号源模块由数字频率合成器 (Direct digital frequency synthesis, DDS) 和低通滤波器组成。数字频率合成器采用 ADI 公司的 DDS 芯片 AD9959,它具有频率分辨率高、范围宽、频率转换

快等优点^[19-20]。结合单片机的控制,可以实现高稳定度的信号输出。AD9959 芯片具有 4 个同步的 DDS 通道,在特定寄存器内写入控制字可以设置每个通道输出信号的频率、相位和幅度,本设计只使用了一个通道 (CH0 - IOUT)。AD9959 输出频率的上限取决于系统时钟频率,本设计的系统时钟采用 25 MHz 的石英晶振,设置参考时钟倍频为 15 倍,可以稳定输出 1 ~ 100 MHz 的正弦波。DDS 芯片在时钟信号的驱动下通过输出离散的模拟电压来逼近正弦曲线。由于其内部模数转换器的精度有限,而且输出每一个电压时都存在着建立时间,导致在输出一个特定频率信号时会携带高次谐波。为了抑制高次谐波,在信号的输出端增加了一个截止频率为 100 MHz 的巴特沃斯低通滤波器,使得通频带内的频率响应曲线比较平坦,从而可有效地滤除高次谐波。图 3 是设计的扫频信号源电路。

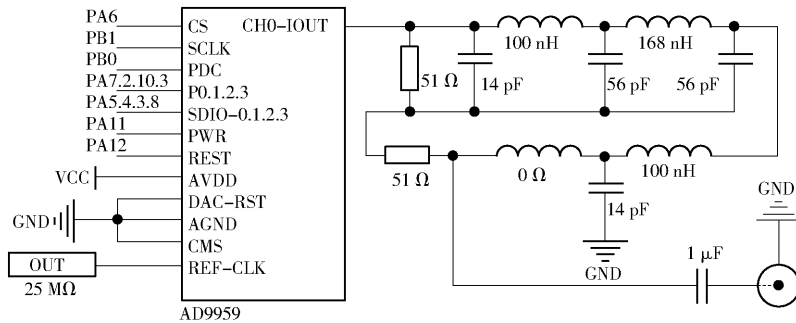


图3 扫频信号源电路图

Fig.3 Scanning signal source circuit diagram

1.2.3 检测模块

检测模块由电桥以及一对平行极板组成。平行极板在使用时浸没在被测的牛乳样本中。平行极板由两块面积为 25 mm²、间距为 6 mm 的铂片组成,铂片电极可以降低电流密度以及施加电场对牛乳的极化。测量时将平行极板浸没在牛乳中。本设计采用的电桥型号为 AYT - 3,适用的频率范围为 1 ~ 500 MHz,特性阻抗为 50 Ω,方向性指数 36 dB 以上,最大输入功率 0.2 W。该电桥有 3 个端口,其中一个端口连接 u_i ,即扫频信号源的输入信号,另一个端口连接 u_o ,第 3 个端口的两端分别连接平行极板的一个电极。

1.2.4 信号处理模块

信号处理模块由两路幅值检测电路和一路相位差检测电路组成。幅值检测电路采用对数检波芯片 AD8318,该芯片能够在 1 MHz ~ 8 GHz 内实现脉冲包络检波^[21]。图 4a 为 U_i 的测量电路,其输出电压 V_{MAG1} 与 U_i 近似呈对数关系,因此采集电压 V_{MAG1} 便可得到 U_i 的信息。 U_o 的测量电路与图 4a 相同,对应

的输出电压为 V_{MAG2} 。相位差 Φ 的检测采用 AD8302 芯片,该芯片能够检测频率在 1 MHz ~ 2.7 GHz 范围内任意两个信号之间的相位差^[22-23]。如图 4b 所示,将 u_i 和 u_o 作为相位检测的输入信号,则二者的相位差与输出电压的关系为

$$V_{PHS} = -V_{\Phi}(\Phi_{u_i} - \Phi_{u_o}) + V_{CP} \quad (4)$$

式中 V_{PHS} ——相位检测电路的输出电压, mV

Φ_{u_i} —— u_i 的相位, (°)

Φ_{u_o} —— u_o 的相位, (°)

V_{Φ} ——斜率,取 10 mV/(°)

V_{CP} ——芯片内部的偏置电压,取 900 mV

根据输出电压 V_{PHS} 可计算出相位差 Φ 。由于幅值检测电路和相位差检测电路输出的电压信号为模拟电压,因此将所得的 3 路模拟信号 V_{MAG1} 、 V_{MAG2} 和 V_{PHS} 输入给单片机的 PA0、PA1 和 PA2 口,进行模拟量到数字量的转换。

1.2.5 输入输出模块

输入输出模块由 3 个按键和 1 个显示器组成。其中 3 个按键分别实现“复位”、“数据发送”和“检

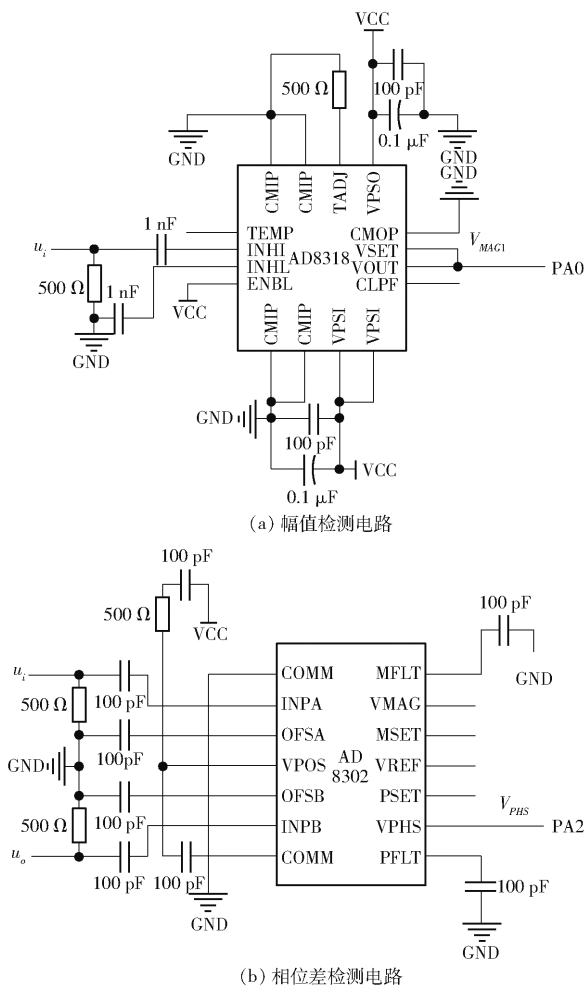


图 4 幅值和相位差检测电路图

Fig. 4 Amplitude and phase difference detection circuits

测”的功能。“发送”按钮用于仪器开发阶段采集数据,在按下按钮之后,会进行扫频并将采集到的数据通过串口发送至计算机。“检测”按钮的功能是进行扫频并获取电桥的输入输出信号参数,调用预测模型,计算蛋白质含量。

显示器采用有机发光二极管 (OLED) 显示屏,其分辨率为 128 像素 × 64 像素,供电电压为 3.3 V。

1.2.6 整体结构设计

检测仪外壳采用 3D 打印机制作,其材料为聚乳酸,尺寸为 170 mm × 120 mm × 120 mm。由一对平行极板构成的检测探头安装于仪器外壳的侧壁上,外壳上设置有电源接口和数据接口,方便数据线插拔和供电。图 5 为该检测仪的样机实物图。

1.3 软件设计

以 MDK 5.0 为开发环境,用 C 语言开发检测仪的软件。该软件主要由主函数、初始化子函数、键盘扫描子函数、扫频子函数、数据采集子函数、串口发送子函数、检测模型子函数和显示子函数组成。初始化子函数用于设置各模块所使用到的 GPIO 口的模式以及各寄存器的配置;键盘扫描子函数用于检

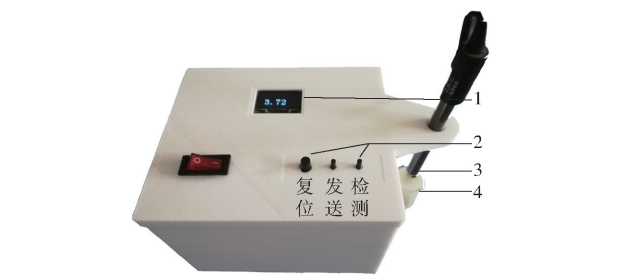


图 5 牛乳蛋白质含量检测仪样机

Fig. 5 Prototype of protein content detector for milk

1. 显示屏 2. 按键 3. 检测探头 4. 牛乳样本

测是否有独立按钮按下,以便执行相应的功能;扫频子函数用于控制扫频信号源输出一个特定频率的正弦波作为整个系统的激励信号;数据采集子函数主要是通过模数转换来采集模拟电压值;串口发送子函数用于将数据发送至上位机数据采集软件;检测模型子函数实现对电桥信号的计算,得到蛋白质含量的预测值;显示子函数可以将预测结果显示在 OLED 显示屏上。软件流程如图 6 所示。

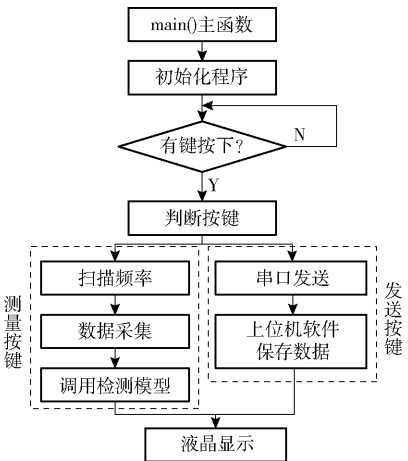


图 6 牛乳蛋白质含量检测仪程序流程图

Fig. 6 Program flow chart of developed software for protein content detector

2 试验材料与方法

2.1 材料

试验所用的生鲜牛乳样本来源于陕西省杨凌区的某两个乳牛场。每天采集 4 ~ 6 个样本,采集之后在 30 min 内运回实验室。共采集来源于不同乳牛的牛乳样本 100 个。试验期间将样本置于室温 ((24 ± 1) °C) 下保存,且试验在 10 h 内完成,样品无变质现象发生。测量前,将牛乳样本放在摇匀仪上振荡 3 min,以保证成分分布均匀。

2.2 试验方法

2.2.1 牛乳蛋白质含量的测量

在室温下用 MilkoScan™ FT1 型乳品分析仪 (丹麦 FOSS 公司) 测定牛乳样本的蛋白质含量。试

验前,先将乳品分析仪预热 20 ~ 30 min,然后对仪器进行校准。校准通过后,对牛乳样品进行测量,每个样本每次测量用样约 40 g。每个样本重复 3 次,3 次测量的平均值作为该样本蛋白质含量(质量比)的测量结果。所有样本蛋白质含量的变化范围为 2.94 ~ 4.71 g/(100 g),标准偏差为 0.41 g/(100 g),说明所采集的样本有较大的蛋白质含量变化范围,样本有代表性。

2.2.2 检测仪输出信号的采集

打开牛乳蛋白质含量检测仪的开关,先预热 2 min。数据采集时,将平行极板浸没于牛乳中,然后点击“数据发送”按键,检测仪将采集 1 ~ 100 MHz 间间隔频率为 0.5 MHz 的 199 个采样点下的电压信号 V_{MAG1} 、 V_{MAG2} 和 V_{PHS} ,并发送至上位机(计算机)。因此,对于每个样品,所采集的数据有 597 个。图 7 为采集的牛乳样品的 V_{MAG1} 、 V_{MAG2} 和 V_{PHS} 的变化曲线。由图 7 可以看出,在 1 ~ 100 MHz 内, V_{MAG1} 和 V_{PHS} 基本稳定,而 V_{MAG2} 随频率的增大而增大,这是由于在 1 ~ 100 MHz 内 DDS 输出信号的幅值基本不变,而牛乳的交流阻抗随着频率的增加而减小。图 8 是所采集的 100 个牛乳样本的 V_{MAG2} 。由图 8 可以看出,对于所有样本,该电压的变化规律相同,但大小有所差异,该种现象也发现于其他两个被检测的信号中。输出电压的差异在于牛乳样本间成分的差异,因此,可以基于输出信号电压的差异预测牛乳的蛋白质含量。

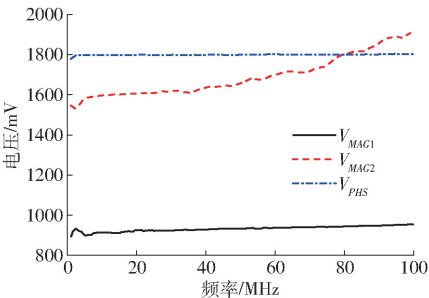


图 7 牛乳样本在 1 ~ 100 MHz 范围采集信号的电压
Fig. 7 Voltage values of collected signals of milk sample in range of 1 ~ 100 MHz

2.3 预测模型建立

为了减小仪器本身存在的随机噪声对输出信号的影响,对所得的电压信号进行窗口宽度为 5 的平滑预处理^[24]。以平滑处理后的信号作为输入(即输入值有 597 个),以乳品分析仪测量得到的蛋白质含量作为输出,采用偏最小二乘法(Partial least squares, PLS)建立预测蛋白质含量的模型。PLS 集成了多元线性回归、主成分分析和相关性分析的优点,在定量研究中得到了广泛的应用^[25]。所构建的 PLS 模型为

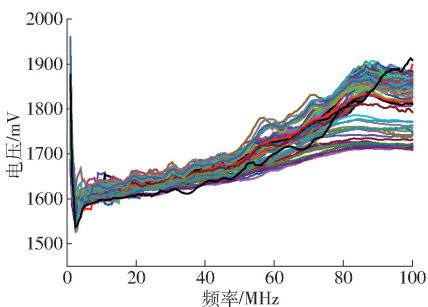


图 8 1 ~ 100 MHz 间 100 个牛乳样本 V_{MAG2} 的变化曲线
Fig. 8 Collected V_{MAG2} of 100 milk samples over range of 1 ~ 100 MHz

$$P = KX^T + b \quad (R^2 = 0.835) \tag{5}$$

其中 $K = [k_1 \quad k_2 \quad \cdots \quad k_{597}]$
 $X = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_{597}]$
式中 P ——蛋白质含量, g/(100g)
 K ——预测模型的系数
 X ——199 个频率点下 V_{MAG1} 、 V_{MAG2} 和 V_{PHS}
 b ——常数

基于所建立的预测模型修改软件,使该检测仪能够直接输出基于电桥输入输出信号参数,得到牛乳蛋白质含量。

3 仪器性能测试

为了对牛乳蛋白质含量检测仪的性能进行验证,另取 20 份生鲜牛乳样本分别用 MilkoScanTM FT1 型乳品分析仪和本仪器测量其蛋白质含量,测量结果如图 9 所示。图 9 表明,测量结果较为紧密地分布在 45° 线的附近,20 份牛乳蛋白质含量在 3.04 ~ 4.11 g/(100 g) 之间,本仪器绝对误差范围为 - 0.11 ~ 0.12 g/(100 g),平均绝对误差为 0.01 g/(100 g)。可见本仪器对于牛乳中蛋白质含量的检测具有较好的检测精度。此外,对仪器的响应时间进行了测试,结果显示,从按下“测量”按键到给出测量结果所用的时间小于 2 min。与杨彪等^[26]基于考马斯亮蓝染色法而开发的牛乳蛋白质含量检测仪相比,本检测仪无需对样本进行任何前

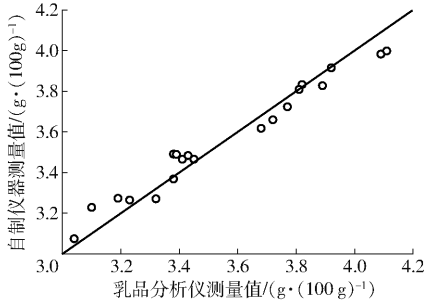


图 9 乳品分析仪与自制仪器测量值的比较
Fig. 9 Comparison of measured values between MilkoScanTM FT1 and self-made detector

期处理,使用更方便。

4 结论

(1)设计了由单片机、扫频信号源模块、检测模块、信号处理模块和输入输出模块组成的牛乳蛋白质含量检测仪硬件系统,并开发了仪器的软件。

(2)基于1~100 MHz范围内199点下获得电

压信号,建立了预测生鲜牛乳蛋白质含量的偏最小二乘模型,该模型的决定系数为0.835。

(3)对所开发仪器的性能进行了测试,结果表明,本仪器蛋白质含量绝对测量误差范围为 $-0.11 \sim 0.12 \text{ g/(100 g)}$,平均绝对测量误差为 0.01 g/(100 g) ,检测时间小于2 min,可以实现生鲜牛乳中蛋白质含量快速和较精确的检测。

参 考 文 献

- [1] BOGOMOLOV A, DIETRICH S, BOLDRINI B, et al. Quantitative determination of fat and total protein in milk based on visible light scatter [J]. Food Chemistry, 2012, 134(1): 412–418.
- [2] 宋宏新,薛建龙,刘立新,等. 采用蛋白质定量方法检测掺假牛乳比较研究[J]. 食品工业, 2015(4): 210–214.
SONG Hongxin, XUE Jianlong, LIU Lixin, et al. Comparative study of methods to detect protein content of adulterate milk [J]. Journal of Food Industry, 2015(4): 210–214. (in Chinese)
- [3] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016 [S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
- [4] 王明,于峰,刘新,等. 采用近红外漫反射技术对牛奶中蛋白质、脂肪检测[J]. 激光杂志, 2015, 36(1): 70–73.
WANG Ming, YU Feng, LIU Xin, et al. Detection of protein, fat in milk by using near infrared diffuse reflectance technique [J]. Laser Journal, 2015, 36(1): 70–73. (in Chinese)
- [5] ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, JIA Yunpeng. Temperature-dependent dielectric properties of raw cow's and goat's milk from 10 to 4 500 MHz relevant to radio-frequency and microwave pasteurization process [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(6): 1830–1839.
- [6] 郭文川,林碧莹. 牛奶含水率介电谱结合化学计量学检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 249–255.
GUO Wenchuan, LIN Biying. Detecting moisture content of cow's milk using dielectric spectra and chemometrics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 249–255. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160935&flag=1. DOI=10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.035. (in Chinese)
- [7] 郭文川,康飞,朱新华. 频率、温度和大豆蛋白对牛乳介电特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 274–278, 115.
GUO Wenchuan, KANG Fei, ZHU Xinhua. Influence of frequency, temperature and soy protein on dielectric properties of raw milk [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 274–278, 115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151036&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.036. (in Chinese)
- [8] ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, LIANG Zhibin. Determination of the fat content in cow's milk based on dielectric properties [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(7): 1485–1494.
- [9] LIU Qiang, GUO Wenchuan, ZHU Xinhua. Effect of lactose content on dielectric properties of whole milk and skim milk [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2018, 53(9): 2037–2044.
- [10] ZHU Xinhua, LIU Qiang, GUO Wenchuan. Dielectric properties of raw milk as influenced by frequency, salts, and salt contents [J]. Journal of Food Process Engineering, 2018, 41(7): e12885.
- [11] ZHU Xinhua, GUO Wenchuan, JIA Yunpeng, et al. Dielectric properties of raw milk as functions of protein content and temperature [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(3): 670–680.
- [12] 郭文川,朱新华. 国外农产品及食品介电特性测量技术及应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 308–312.
GUO Wenchuan, ZHU Xinhua. Foreign dielectric property measurement techniques and their applications in agricultural products and food materials [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 308–312. (in Chinese)
- [13] CORONEL P, SIMUNOVIC J, SANDEEP K P. Temperature profiles within milk after heating in a continuous-flow tubular microwave system operating at 915 MHz [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(6): 1976–1981.
- [14] MURTHY V J, KIRANMAI N S, KUMAR S. Study of dielectric properties of adulterated milk concentration and freshness [J]. Materials Science and Engineering, 2017, 225: 012285.
- [15] 胡珂文,盖铃,叶尊忠,等. 阻抗谱测量在微生物快速检测研究中的应用[J]. 中国食品学报, 2009, 9(3): 162–167.
HU Kewen, GAI Ling, YE Zunzhong, et al. Application of impedance spectroscopy measurement in rapid detection of microorganisms [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2009, 9(3): 162–167. (in Chinese)
- [16] LOPES A M, TENREIRO M J A, RAMALHO E, et al. Milk characterization using electrical impedance spectroscopy and fractional models [J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(3): 901–912.
- [17] LEWANDOWSKI A, SZYPOWSKA A, KAFARSKI M, et al. 0.05–3 GHz VNA characterization of soil dielectric properties based on the multiline TRL calibration [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(2): 024007.

- [18] 王晨辉,吴悦,杨凯. 基于 STM32 的多通道数据采集系统设计[J]. 电子技术应用,2016,42(1): 51-57.
WANG Chenhui, WU Yue, YANG Kai. Design of multi-channel data acquisition system based on STM32 [J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(1): 51-57. (in Chinese)
- [19] 张颖立,唐小明,何文龙,等. 基于 DDS 的多通道信号源设计[J]. 现代电子技术,2011, 34(24): 177-180.
ZHANG Yingli, TANG Xiaoming, HE Wenlong, et al. Design of multi-channel signal source based on DDS [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(24):177-180. (in Chinese)
- [20] ALBITTAR I F I, DOGAN H. A frequency multiplier for reference frequency in frequency synthesizer systems [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2018, 94(1): 147-154.
- [21] 李星,许国宏,王耀磊. 高精度幅相检测系统的设计[J]. 电子设计工程,2012,20(1): 123-125.
LI Xing, XU Guohong, WANG Yaolei. Design of high-precision magnitude and phase measuring system [J]. Electronic Design Engineering, 2012, 20(1): 123-125. (in Chinese)
- [22] MOHAMADOU Y, MOMO F, THEOPHILE L, et al. Accuracy enhancement in low frequency gain and phase detector (AD8302) based bioimpedance spectroscopy system [J]. Measurement, 2018, 123: 304-308.
- [23] 杨宇祥,王珏,牛飞龙,等. 基于 AD8302 的生物阻抗频谱测量仪的研制[J]. 仪器仪表学报,2006,27(增刊1): 168-170.
YANG Yuxiang, WANG Yu, NIU Feilong, et al. Development of a bioimpedance spectrometer based on AD8302 [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Supp.1): 168-170. (in Chinese)
- [24] DE MARCHI M, BONFATTI V, CECCHINATO A, et al. Prediction of protein composition of individual cow milk using mid-infrared spectroscopy [J]. Italian Journal of Animal Science, 2010, 8(Supp.2): 399-401.
- [25] XU Fengdong, SU Rui, XU Nan, et al. Portable analyzer for rapid analysis of total protein, fat and lactose contents in raw milk measured by non-dispersive short-wave near-infrared spectrometry [J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2013, 29(1): 15-19.
- [26] 杨彪,王凯,韩天宇,等. 便携式牛乳蛋白质含量检测仪设计与验证[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(3):317-322.
YANG Biao, WANG Kai, HAN Tianyu, et al. Design and validation on portable detector for protein content in milk [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):317-322. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190335&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.035. (in Chinese)
-

(上接第 386 页)

- [21] 程丽,马微,刘祺,等. 基于太赫兹衰减全反射光谱的甘氨酸溶液定量研究[J]. 食品与机械,2019,35(8):69-72.
CHENG Li, MA Wei, LIU Qi, et al. Quantitative analysis of glycine solutions by Terahertz attenuated total reflection (THz-ATR) spectra[J]. Food & Machinery, 2019,35(8):69-72. (in Chinese)
- [22] 刘翠玲,胡莹,吴静珠,等. 基于太赫兹衰减全反射技术的花生霉变程度判别[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):333-338,355.
LIU Cuiling, HU Ying, WU Jingzhu, et al. Discrimination of peanut mildew degree based on Terahertz attenuated total reflection spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):333-338,355. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190438&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.038. (in Chinese)
- [23] CHU X L, XU Y P, TIAN S B, et al. Rapid identification and assay of crude oils based on moving-window correlation coefficient and near infrared spectral library[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2011, 107(1):44-49.
- [24] 王泓鹏,万雄. 基于植物油可见吸收光谱的相关系数鉴别特级初榨橄榄油[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(9):2814-2819.
WANG Hongpeng, WAN Xiong. Distinguishing extra virgin olive oil based on the correlation coefficient of visible absorption spectrum of vegetable oil[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(9): 2814-2819. (in Chinese)
- [25] 张正勇,沙敏,桂冬冬,等. 基于移动窗口相关系数光谱法的白酒品牌快速判别技术研究[J]. 光谱学与光谱分析,2017, 37(10):3122-3126.
ZHANG Zhengyong, SHA Min, GUI Dongdong, et al. Research on the rapid discrimination technology of the Chinese liquor brands based on the moving window correlation coefficient spectral method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(10): 3122-3126. (in Chinese)