Design of Wheat Moisture Detector Based on Near Infrared Spectroscopy*

*FAN Congshan**

(*Yangzhou Industry Polytechnic Institute*, *Yangzhou Jiangsu* 225127, *China*)

Abstract: According to the requirement of rapid and continuous measurement of wheat moisture, we designed a type of wheat moisture moisture detector based on near infrared spectroscopy. The instrument used semiconductor laser and high sensitive photoelectric receiving tube to construct a stable optical path system, and the weak wheat water signal was extracted by relevant detection and software filtering models. Compared with the standard water content of the wheat, the working function of wheat moisture was obtained. The actual measurement error was less than 2.76%. The test showed that the instrument improved the instrument stabilizer and measurement accuracy by means of high stable light optical circuit and high signal to noise ratio weak signal extraction circuit, and the test error was consistent with the design requirements.

Key words: near infrared spectroscopy; wheat moisture detection; correlation detection; semiconductor laser; work function

EEACC: 7210 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.02.049

基于近红外光谱的小麦水分检测仪设计*

范丛山*

(扬州工业职业技术学院,江苏 扬州 225127)

摘 要:针对小麦水分快速连续测量的要求,设计了一型基于近红外光谱原理的小麦水分检测仪。该仪器采用半导体激光器和高灵敏度光电接收管构建稳定的光路系统,采用相关检测、软件滤波等方法提取微弱小麦水分信号,并与标准水分含量小麦对比,得到了小麦水分的工作函数,实际测量误差最大为 2.76%。试验表明:该仪器通过高稳定光路系统和高信噪比弱信号提取电路,提高了仪器稳定器和测量精度,测试误差满足设计要求。

关键词:近红外光谱;小麦水分检测;相关检测;半导体激光器;工作函数

中图分类号:TH744 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-9490(2019)02-0525-05

我国是粮食生产大国,小麦更是我国半数以上人口的主粮,而小麦的水分含量是其重要的指标,对小麦的运输、储藏都有重要的意义。目前对于小麦水分的测量,主要有卡尔费休法、电容法、电导法等,但都存在测试时间长、无法在线测试等弊端[1]。

本文根据近红外光谱吸收原理,设计了一型小麦水分检测仪[2],仪器通过搭建高稳定性、高灵敏度光路系统,并采用信号调制、相关检测、软件滤波等弱信号提取方法搭建电路系统,实现了小麦水分的快速实时测量,具有仪器工作稳定,测量误差小等优点,取得了良好的应用效果。

1 近红外小麦水分检测原理及总体方案

1.1 近红外小麦水分检测原理

根据近红外光谱吸收原理,本仪器采用漫反射光谱法测定小麦中水分的含量。漫反射光谱测定法是农产品分析中最常用到的光谱分析技术,遵循库贝尔卡-蒙克方程:

$$R'_{\infty}=1+K/S-[(K/S)^2+2(K/S)]^{1/2} \quad (1)$$

式中:K 为漫反射的吸光系数,S 为散射系数。R'_{∞} 为样品厚度无穷大时的绝对漫反射率,在相同光学条件下 S 不变,所以它与漫反射体的吸光系数 K 成正比。因此可通过测量 K 值来确认[3]。但实际工作中物质的绝对漫反射率很难测量,因此在实际工作中引入反射光强度 A 来表示物质吸收光的多少:

$$A=\lg(1/R_{\infty})=-\lg\left\{1+\frac{K}{S}-\left[\left(\frac{K}{S}\right)^2+2\frac{K}{S}\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (2)$$

式中:R_{∞} 为样品厚度无穷大时的相对温反射率,且有

项目来源:国家自然科学基金项目(61573307)
收稿日期:2018-03-06 **修改日期**:2018-05-18

$$R_\infty=\frac{r'_{\infty\text{样品}}}{R_{\infty\text{参比}}}=1+\frac{K}{S}-\left[\left(\frac{K}{S}\right)^2+2\left(\frac{K}{S}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中：$R'_{\infty\text{样品}}$和$R'_{\infty\text{参比}}$分别是样品和白板的漫反射光强度；另在一定的K/S范围内，A与K/S呈近似线性关系[4]，可用下式表示：

$$A=m+n\frac{K}{S} \tag{3}$$

式中：K与小麦水分c在一定范围内也呈线性关系，因此根据式(2)、式(3)，及本仪器测试对象可得：

$$\frac{R'_{\infty\text{被测小麦}}}{R'_{\infty\text{参比信号}}}=m'+n'c \tag{4}$$

式中：$R'_{\infty\text{被测小麦}}$和$R'_{\infty\text{参比信号}}$可以通过仪器测量，m'和n'可以通过曲线拟合得到，从而计算出小麦水分c。因此本仪器的工作重点就是求取经过小麦和白板吸收后的$R'_{\infty\text{被测小麦}}$和$R'_{\infty\text{参比信号}}$，并通过与标准水分含量小麦对比，以得到参数m'和n'，最终求取小麦水分含量c[5-6]。

1.2 近红外小麦水分检测仪光器件选择

小麦中水分的光谱吸收曲线如图 1 所示。在 1 450 nm 和 1 950 nm 处有两个特征吸收波长，同时对比小麦中其他成分的吸收波长及市场上常用的光源，综合考虑选择香港宝利通科技有限公司的波长为 1 950 nm 的半导体激光器作为发射光源，与传统仪器采用卤钨灯作为发射光源相比，具有方向性好、单色性好的优点；且体积小，方便了仪器结构的设计。

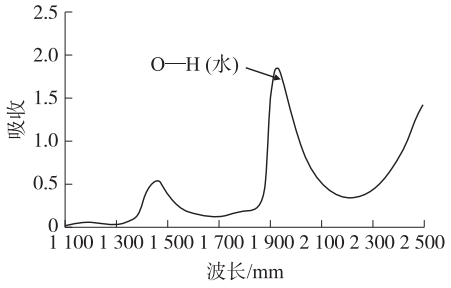

图 1 小麦水分近红外光谱吸收曲线

光电接收器件选用北京敏光科技有限公司的 LSIPD21-0.3 光电二极管，其波长相应曲线如图 2 所示。波长相应范围为 800 nm~2 100 nm，在 1 950 nm 处具有非常好的响应灵敏率。

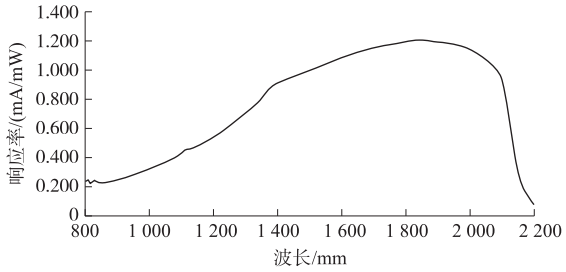

图 2 LSIPD21-0.3 光电二极管响应曲线

1.3 近红外小麦水分检测仪总体方案

根据前节所述小麦水分检测原理，设计了本仪器的总体方案，如图 3 所示。

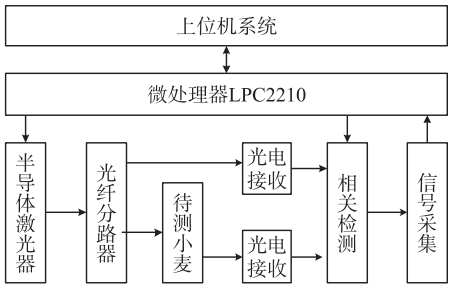

图 3 近红外小麦水分检测仪总体方案

如图 3 所示。本仪器选择飞利浦公司的微处理器 LPC2210 作为控制核心，首先输出控制时序驱动半导体激光器工作，半导体激光器输出的光信号首先连接至光纤分路器，其中一路照射到白板后通过光电接收管接收其漫反射光得到参比信号，另一路照射到待测小麦后通过光电接收管接收其漫反射光信号得到测量信号。为抵消空间水气背景对测量产生的误差，在系统结构设计时将光纤分路器输出的参比信号传输路径设计为与测量信号相近的传输路径，然后将两路信号输出至相关检测模块，实现信号的解调及提取，最后通过 LPC2210 自带的 AD 采集模块输入到微处理器中，进一步进行软件滤波、数据计算等[7]，并通过串口将计算数据传输到上位机系统，完成仪器的标校、工作函数的计算等工作。

2 近红外小麦水分检测仪主要模块设计

根据前节图 3 所示，近红外小麦水分检测仪的主要模块包括相关检测模块和在微处理器中实现的软件滤波模块，这两个模块是微弱信号检测的关键部分。本节将重点介绍这两个模块的实现原理及实现过程。

2.1 相关检测模块

由于经过小麦吸收、光电检测后的信号十分微弱，且淹没在噪声中，因此本文设计了相关检测模块来提取淹没在噪声中的微弱信号。相关检测是利用信号周期性和噪声随机性的特点，通过相关运算，将淹没在噪声中的周期信号携带的信息检测出来，以达到去除噪声的目的[8]。

本文设计的相关检测模块示意图如图 4 所示。

微处理器输出控制方波驱动光源工作，光电接收管输出的微弱小麦水分检测信号和参比信号经过前置放大电路后输入到电子开关的输入端，同时微处理器输出另一路同样时序的参考方波信号，经过移相电路输入到电子开关的控制端，并将移相后的

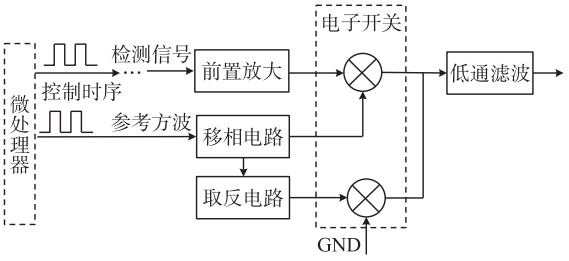

图 4　相关检测原理示意图

参考方波反向后与信号地相乘控制低电平的输出,以达到消除背景干扰光的目的,电子开关动作后经过低通滤波器滤除高频分量后,即可得到所需要的小麦水分检测信号。

本文设计的相关检测模块被检测信号和参考信号均为方波信号,其中被检测信号 $x(t)$ 用其傅立叶级数可表示为:

$$x(t)=\frac{4V_s}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1}\cos[(2n-1)\omega_0 t+\theta] \quad (5)$$

式中:V_s 为被测信号幅度,ω_0 为基频。参考信号方波的傅立叶级数可表示为:

$$r(t)=\frac{4V_r}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1}\cos(2n-1)\omega_0 t \quad (6)$$

式中:参考信号方波幅度用 V_r 表示。将 $x(t)$ 与 $r(t)$ 相乘并通过后续的低通滤波器滤除高频信号后可表示为:

$$u_0(t)=\frac{1}{T_0}\int_0^{T_0}x(t)\cdot r(t)\,dt \quad (7)$$

当 T_0 足够大时,上式的结果即为 $x(t)\cdot r(t)$ 的平均值,即本文所需要求解的小麦水分含量所测参数 $R_{\infty\,被测小麦}$ 和 $R_{\infty\,参比信号}$。

(1)前置放大电路设计

经过小麦吸收后的光电接收信号十分微弱,在几十毫伏的量级,因此首先需将光电管 LSIPD21-0.3 的输出信号进行前置放大,设计的前置放大电路图如图 5 所示。

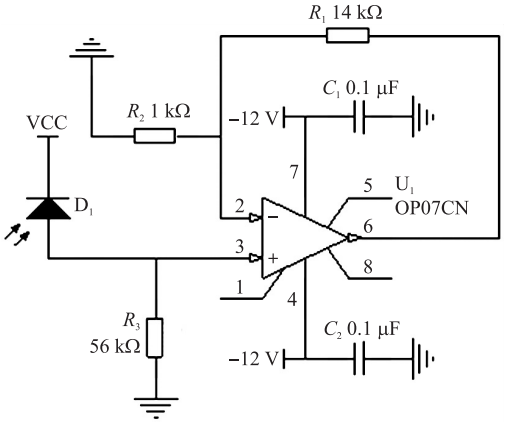

图 5　前置放大电路原理图

当激光器的光束照射到被测小麦,其反射光通过光电管 LSIPD21-0.3 接收时,反向电流与照度成正比,假设该时刻光电管的反相电流为 i,则运算放大器 OP07 的正端电压为 $V_+=i\cdot R_3$,其输出电压为 $V_o=\frac{R_1+R_2}{R_2}V_+=\frac{R_1+R_2}{R_2}\cdot i\cdot R_3$,将输入电压放大了 15 倍。

(2)移相电路设计

由于经过小麦吸收、电/光、光/电转换后的方波控制时序相对初始控制时序有了一定相移,因此为保证后续被测信号与参考信号相乘后取得更高的检测信噪比,需将参考方波信号也经过移相,设计了模拟移相电路如图 6 所示。

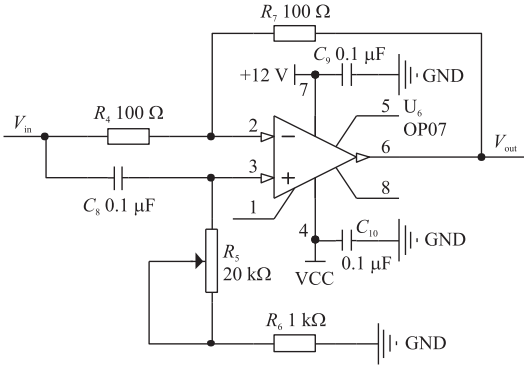

图 6　移相电路原理图

该电路相移传递函数:

$$\varphi(\omega)=\arctan\left[\frac{\omega C_8(R_5+R_6)R_4}{R_7}\right]+\arctan[\omega C_8(R_5+R_6)]$$

式中:ω 为参考方波的频率。移相角度通过上图中电阻 R_5 来调整,经过测试,该电路移相角度范围达到 0~180°,满足仪器设计要求。

(3)电子开关设计

本仪器采用的被测信号和参考信号均为方波,因此信号相乘的过程可以采用电子开关来实现,与通常采用正弦波作为调制信号或参考信号相比,可以大大提高仪器的工作速度,并简化硬件设计和降低成本。本文采用 CD4066 电子开关来实现信号的相乘,实现电路如图 7 所示。其中 CD4066 是双向开关,内部集成了 4 个能独立控制数字及模拟信号传送的模拟开关。在本仪器中,将接收信号功放后分别连接其中两个模拟开关的输入端,并与移相后的正向方波信号进行相乘;同时为了消除干扰环境光的影响,将两路参考方波反相后与信号地接入 CD4066 的另两个开关;对应的被测小麦输出信号及其反相信号输出后经过同一个运算放大器 OP07 增加驱动能力,同样的参比输出信号及其反相信号也作相同的处理。在通过后面的低通滤波器滤除高频成分后,即可得到所需要的被测小麦水分信号和参比信号。

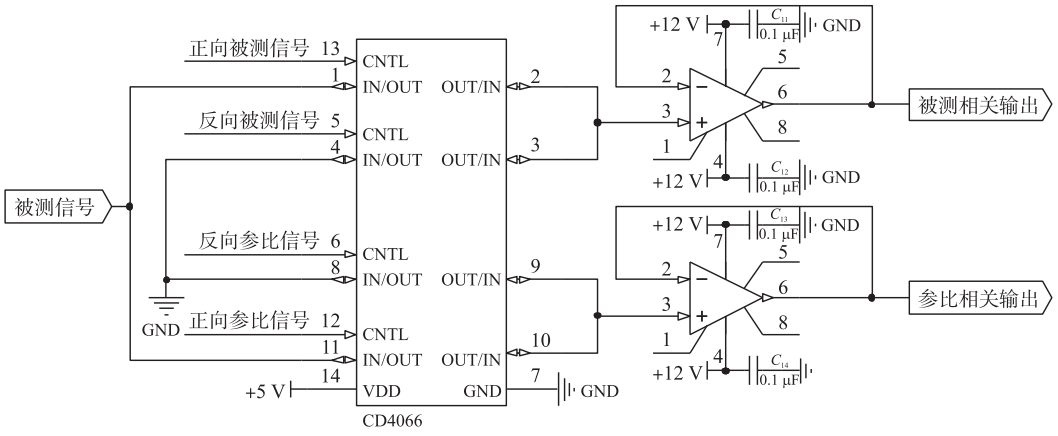

图 7 电子开关实现信号相乘电路原理图

2.2 软件滤波模块

本仪器的软件处理在微处理器 LPC2210 中实现,主要实现包括控制时序、AD 采样、软件滤波、与上位机的通信等功能,本节重点介绍软件滤波模块。

经过相关检测后的模拟信号虽然滤除了大部分高频噪声,但仍然存在包括工频干扰、基线漂移等其他噪声,因此在经过 AD 采样进入处理器后,进一步数字滤波,以取得更好的处理效果和检测精度[9]。由于 LPC2210 内硬件资源丰富,本文根据仪器要求,设计了高阶 FIR 数字滤波器,与传统的在单片机中实现的中值滤波、限幅滤波以及简单整系数数字滤波器相比,具有更好的滤波效果。FIR 滤波器用式(8)表示:

$$y(n)=\sum_{k=0}^{N-1}h(k)x(n-k) \tag{8}$$

式中:$x(n)$为经过 AD 采样后的原始输入信号,$h(k)$为所设计 FIR 滤波器的单位冲激响应,N 为滤波器的阶数,$y(n)$为经过滤波器后的输出信号。本文 FIR 数字滤波器设计参数为:通带截止频率f_p=5 Hz,阻带衰减系数α_s=20 dB,采样频率f_s=150 Hz[10]。设计流程如下:首先利用 MATLAB 软件对上述参数进行仿真,得到幅频响应曲线如图 8 所示。

根据 MATLAB 仿真结果,滤波器阶数 N 为 28。然后将 MATLAB 中计算的 FIR 滤波器参数 $h(k)$经过截断、放大、取整处理后存储在微处理器 LPC2210 中,供 LPC2210 中的数字滤波程序直接调用处理。

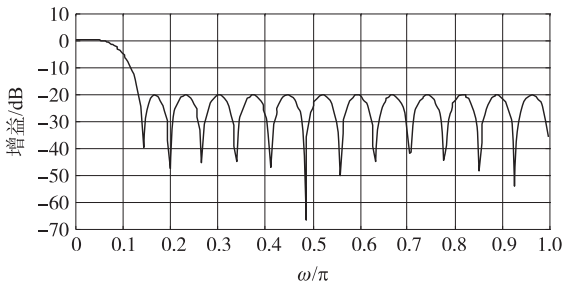

图 8 FIR 低通滤波器幅频响应图

3 近红外小麦水分检测仪标校及测试

将在微处理器 LPC2210 中经过提取和滤波处理后的小麦水分信号和参比信号进行比值计算后传输到上位机中,代入式(4)并与标准小麦样品进行比对测量,通过曲线拟合得到式(4)中的系数 m'和 n',以此得到小麦水分的计算公式,然后将其计算结果与实际水分含量进行比对分析,以评估该仪器测试精度是否满足要求[11-12]。仪器标校及测试过程如图 9 所示。

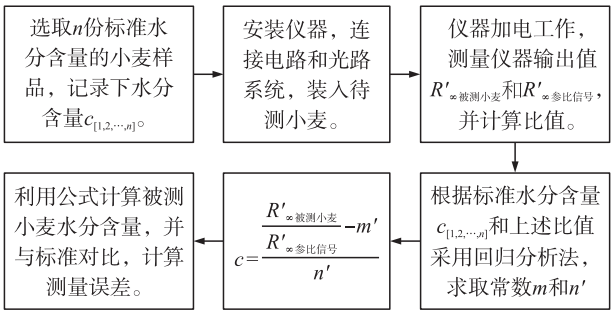

图 9 近红外小麦水分检测仪标校和测试流程图

上述标校和测试过程在上位机中完成,经过$\frac{R'_{\infty\text{被测小麦}}}{R'_{\infty\text{参比信号}}}$计算、曲线拟合后,可得到本仪器的工作函数为:$c=\dfrac{\frac{R'_{\infty\text{被测小麦}}}{R'_{\infty\text{参比信号}}}-0.146}{0.082}$。由于本仪器采用半导体激光器作为发射光源,并采用高灵敏度光电接收管 LSIPD21-0.3,光路系统工作稳定;电路系统中设计了相关检测电路、软件滤波等,检测信噪比高;因此当电路系统和光路系统确定并经过上述标校后,系统的工作函数就确定了,后续可长期使用,只有当更换光器件或模拟电路时,才需要重新标校。

在仪器标校完成后,将计算的工作函数的参数下载到单片机 LPC2210 中,然后各选取 1 000 g 不同水

分含量的标准小麦样品进行测量比对,得到测试结果如如表 1 所示,本仪器的测量值与标准值进行对比测量,误差最大为 2.76%,满足仪器的使用要求。

表 1　本仪器与标准水分含量的小麦对比测量

标准水分含量/%	本系统$\frac{R'_{\infty\text{被测小麦}}}{R'_{\infty\text{参比信号}}}$	本系统水分含量/%
9.8	0.154 1	9.96
10.6	0.154 8	10.81
11.6	0.155 3	11.43
12.8	0.156 6	12.99
13.2	0.156 7	13.05
13.8	0.157 1	13.48
14.6	0.158 3	14.98
15.2	0.158 8	15.62

4　结束语

根据近红外光谱原理设计了一型小麦水分检测仪。该仪器采用半导体激光器和高灵敏度光电接收管构成稳定的光路系统,受环境光影响较小;并采用相关检测方法提取微弱小麦水分信号,在处理器中进一步软件滤波处理,提高了检测信噪比;最后在上位机中通过回归分析法得到了小麦水分含量计算的工作函数,测量结果满足设计及使用要求。

范丛山(1964-),男,汉族,江苏海安人,扬州工业职业技术学院,副教授、高级工程师,电气控制与自动化,771505817@qq.com。

参考文献:

[1] 胡平欣. 电容式粮食水分在线检测系统的研究[D]. 沈阳:东北大学,2012.
[2] 宦克为. 小麦内在品质近红外光谱无损检测技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2014.
[3] 孙腾飞,张腾腾,郑田甜. 光在苹果组织中传输的光谱特性[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(11):3088-3091.
[4] 刘玲玲. 小麦品质近红外光谱分析系统关键技术研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2013.
[5] 郭志明,黄文倩,彭彦昆. 高光谱图像感兴趣区域对苹果糖度模型的影响[J]. 现代食品科技,2014,30(8):59-63.
[6] 刘燕德,应义斌,蒋焕煜. 基于光纤传感的富士苹果糖度检测试验研究[J]. 传感技术学报,2003,16(3):328-331.
[7] 叶飞,董玉德,杨先龙. 一种基于 MCU 的便携式粮食水分检测仪的设计[J]. 西安工程大学学报,2014,28(3):288-292.
[8] 周敏. 基于相关原理的弱信号检测系统的研究与应用[D]. 武汉:武汉工程大学,2016.
[9] 赵鹏. 反射式近红外小麦水分检测技术[D]. 洛阳:河南工业大学,2015.
[10] 孙田雨. 并行 FIR 滤波器系数设计及结构优化[D]. 杭州:浙江大学,2017.
[11] 赖立群. 基于近红外光谱的小麦品质参数快速检测[D]. 杭州:中国计量学院,2015.
[12] 郭志明. 基于近红外光谱及成像的苹果品质无损检测方法和装置研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.