

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.02.025

# 鲜茧茧层含水率与干壳量 无损快速检测装置设计与试验<sup>①</sup>

宋 杰, 井 伟, 李光林, 罗红品, 马 驰

西南大学 工程技术学院, 重庆 400716

**摘要:** 鲜茧茧层含水率与干壳量是桑蚕鲜茧评级的重要指标。基于 LC 振荡电路的鲜茧茧层含水率测量方法, 搭建了鲜茧茧层含水率与干壳量无损检测的硬件平台, 利用 871×872、洞庭×碧波和两广二号 3 个品种鲜茧完成了水分传感器的标定, 利用 M1 级的标准砝码和 JJ1023BC 型电子天平完成了称质量传感器的标定, 在此基础上, 完成了控制软件设计开发。试验表明, 设计开发的无损快速检测装置检测鲜茧茧层含水率的相对误差小于 0.96%, 检测干壳量的相对误差小于 2.04%, 整个系统完成两个物理量检测的时间小于 2 min, 实现了含水率和干壳量的无损快速检测。

**关键词:** 鲜茧; 茧层含水率; 干壳量; 无损; 快速检测

**中图分类号:** TP274+.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2018)02-0179-07

鲜茧茧层含水率与干壳量是桑蚕鲜茧评级的重要指标<sup>[1-2]</sup>。现有评茧仪与茧层含水率测量仪多数都需要切割鲜茧进行有损检测, 存在检验时间较长和资源浪费的弊端, 少数茧层含水率测量仪利用电阻法测湿的原理实现对鲜茧茧层含水率的无损测量, 但其功能单一, 不能同时测量鲜茧的干壳量, 而且测量误差较大、重复性较差, 往往需要进行多次测量取平均值。因此, 研发集茧层含水率与干壳量一体的无损快速检测仪器具有重要意义。

国外研究人员对鲜茧茧层含水率与干壳量无损检测的研究报道较少, 国内科技工作者在鲜茧茧层含水率或干壳量无损检测方面进行了大量理论研究。陈原等提出了基于振动信号的干壳量无损检测方法<sup>[3-8]</sup>, 甘勇等提出了基于图像处理技术的干壳量无损检测方法<sup>[9-10]</sup>, 金航峰等提出了基于光谱技术的干壳量与茧层含水率无损检测方法<sup>[11-16]</sup>, 但这些无损检测方法目前处于理论探索阶段, 还没有成熟的仪器设备用于鲜茧茧层含水率和干壳量的快速无损检测。井伟在《鲜茧茧层含水率与干壳量快速测量研究》中采用 4 个电极板设计了鲜茧茧层水分传感器<sup>[17]</sup>, 通过称质量传感器检测茧层失水质量, 取得了较好的实验效果, 本文在此基础上进行改进, 提出了基于 LC 振荡电路的鲜茧茧层含水率测量方法, 研究设计了一种鲜茧茧层含水率与干壳量无损快速检测装置并进行了试验验证。

## 1 鲜茧茧层含水率与干壳量测量原理

鲜茧茧层含水率测量原理电路如图 1 所示。

① 收稿日期: 2016-07-08

基金项目: 重庆市应用开发计划项目(cstc2013yykfA80015)。

作者简介: 宋 杰(1985-), 男, 四川都江堰人, 讲师, 博士研究生, 主要从事智能检测与控制研究。

通信作者: 李光林, 教授, 博士。

图中,  $U_s$  为激励源、 $I_x$  为回路电流、 $r$  为等效电阻、 $R$  为采样电阻、 $L$  为电感、 $C$  为平板电容, 极板间介质为鲜茧。

研究表明, 对于谷物、坚果等带壳的物质, 其相对介电常数在一定范围内与其含水率呈线性关系<sup>[18-25]</sup>。假设鲜茧符合这种规律, 其相对介电常数记为  $\epsilon_x$ , 忽略环境温度、湿度的影响, 则有:

$$\epsilon_x = kM_C + b \quad (1)$$

上式中  $k$  为系数,  $b$  为常数,  $M_C$  为鲜茧茧层含水率。

采样电压可表示为

$$|V_R| = \frac{|U_s| R / (R + r)}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\pi f L}{R + r} - \frac{d}{2\pi f (R + r) \epsilon_0 S (kM_C + b)} \right)^2}} \quad (2)$$

上式中  $f$  为激励频率,  $d$  为极板间距,  $S$  为极板面积。

电路的谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\epsilon_0 L S}{d} (kM_C + b)}} \quad (3)$$

激励频率与采样电压的关系如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 当激励频率在谐振频率附近时, 采样电压幅值较大, 此时采样电压随茧层含水率变化较为明显。因此, 应设置适当的激励频率, 以保证控制系统能检测到采样电压的变化。

当鲜茧茧层含水率为 0 时, 电路谐振频率为:

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\epsilon_0 L S b}{d}}} \quad (4)$$

研究表明, 当  $f < f'_0$  时, 采样电压  $|V_R|$  随鲜茧茧层含水率  $M_C$  增大而增大, 当  $f > f'_0$  时, 采样电压  $|V_R|$  随鲜茧茧层含水率  $M_C$  增大而减小, 采样电压  $|V_R|$  与鲜茧茧层含水率  $M_C$  的变化关系如图 3 所示。

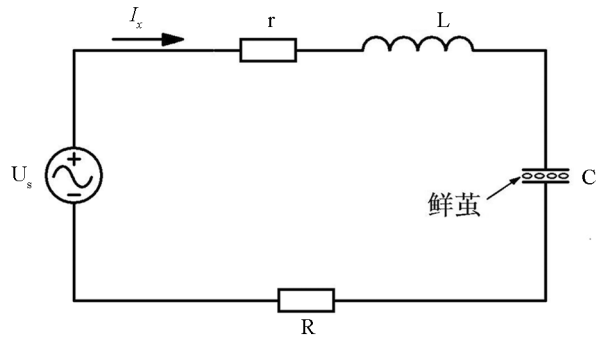


图 1 鲜茧茧层含水率测量原理电路

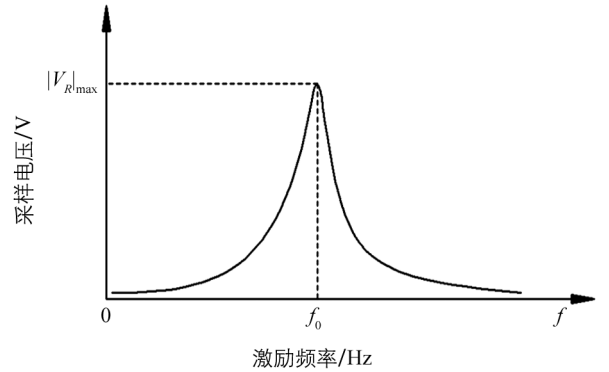


图 2 激励频率与采样电压关系示意图

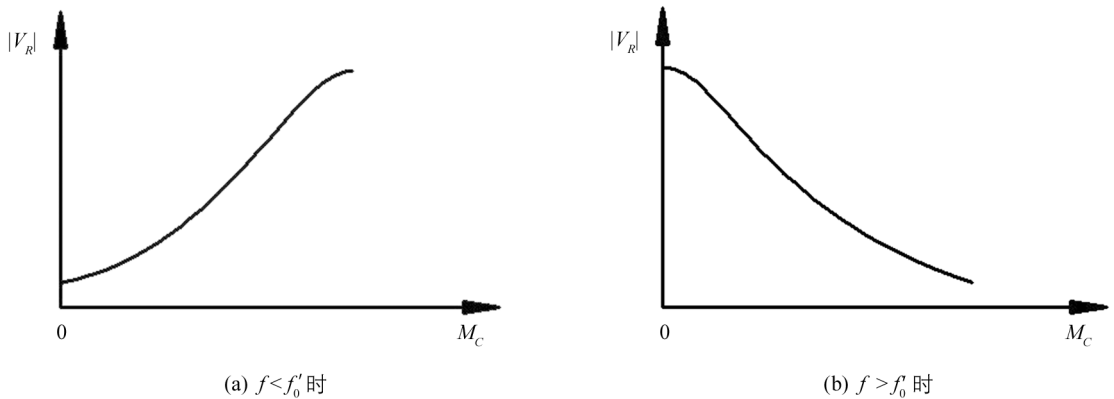


图 3 采样电压与鲜茧茧层含水率变化关系示意图

由(3)式可知, 电路的谐振频率  $f_0$  随鲜茧茧层含水率  $M_C$  的增加而减小, 当设置激励频率  $f < f'_0$  时, 随着  $M_C$  的增大, 有可能出现  $f > f_0$  的情况, 表现为  $|V_R|$  出现峰值拐点, 不满足实际测量要求, 而设置  $f > f'_0$  则不会出现上述情况, 通过实验数据进行拟合, 即可得到  $M_C$  与  $|V_R|$  的数学关系式。

在此基础上, 根据参考文献[17]所述方法, 对鲜茧进行短暂热处理, 并测出热处理前后鲜茧质量和茧层含水率, 可得到干壳量的计算公式为

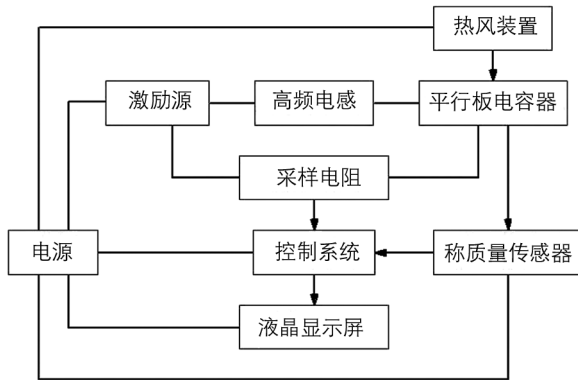
$$m_0 = \frac{m_1 - m_2}{\omega_1 - \omega_2} \times (1 - \omega_1) \times (1 - \omega_2) \quad (5)$$

上式中  $m_0$  为鲜茧的干壳量,  $m_1$ 、 $m_2$  为热处理前后鲜茧的质量, 单位为 g,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为热处理前后鲜茧的茧层含水率。

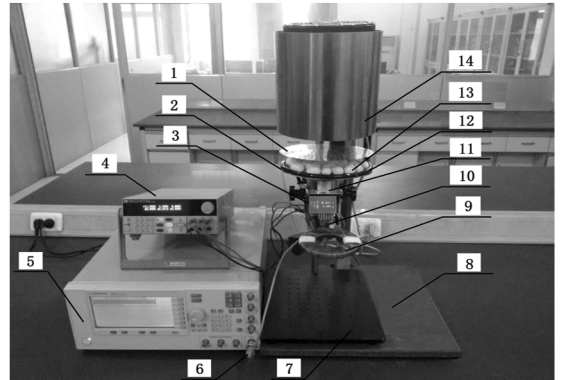
## 2 装置结构与工作原理

### 2.1 装置结构框图与实物图

鲜茧层含水率与干壳量无损快速检测装置结构框图与实物图如图 4 所示。



(a) 装置结构框图



(b) 装置实物图

1. 上极板; 2. 下极板; 3. 液晶显示屏; 4. 多输出电源; 5. 高频信号发生器; 6. 信号转接头; 7. 多功能台架; 8. 热风装置支架; 9. 高频电感; 10. 控制系统; 11. 称质量传感器; 12. 硅胶护栏; 13. 鲜茧; 14. 热风装置。

图 4 鲜茧层含水率与干壳量无损快速检测装置结构框图与实物图

为了保证电容极板间能容纳 50 g 左右鲜茧平铺一层, 且尽量降低系统工作频率、减小电场边缘效应, 设计电容极板面积为  $314 \text{ cm}^2$ , 极板间距 3 cm, 电感磁芯磁导率为  $26 \mu\text{H}$ , 电感系数为  $48 \text{ nH/T}^2$ , 匝数为 100. 为方便取放茧, 上极板设计为可水平转动. 为了快速对鲜茧进行热处理, 设计了热风装置替代烘箱, 功率为  $0 \sim 500 \text{ W}$ , 出风温度为常温至  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , 最大风量:  $13 \text{ m}^3/\text{min}$ , 最大风压:  $30 \text{ Pa}$ , 这样设计能够保证热风温度达到试验测试要求, 同时避免风力过大造成称质量传感器过载。

### 2.2 系统工作频率的确定

试验材料为鲜茧, 来源于重庆蚕科院, 品种包括:  $871 \times 872$ 、洞庭  $\times$  碧波、两广二号, 各 5 kg. 试验设备包括: LPCD-E3000 型恒温烘箱、DSO6034A 型示波器、JJ1023BC 型电子天平各 1 台。

随机从  $871 \times 872$ 、洞庭  $\times$  碧波、两广二号鲜茧中各取出 10 份样品(每份样品约 50 g), 对 3 个品种的鲜茧分别进行 10 次试验测试, 结果取平均值. 利用 LPCD-E3000 型恒温烘箱在  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下对鲜茧进行热处理直至鲜茧质量基本不变, 将鲜茧取出并平铺在下方电极上(硅胶护栏内侧), 调节高频信号发生器的输出频率, 利用 DSO6034A 型示波器观察采样电压变化, 当采样电压最大时记录输出频率的值, 试验数据如表 1 所示。

表 1 激励频率试验测试结果

品种	鲜茧质量 平均值( $m$ )/g	蚕蛹质量 平均值( $m'$ )/g	干壳量 平均值( $m_0$ )/g	谐振频率 ( $f_x$ )/kHz	采样电压 幅值( $ V_R _{\max}$ )/V
871 $\times$ 872	49.875	38.653	9.593	337.37	2.154
洞庭 $\times$ 碧波	50.138	39.108	9.446	335.40	2.154
两广二号	49.902	39.023	9.329	335.77	2.154

由表 1 结果可以看出, 3 个品种的谐振频率分别为 335.77, 335.40, 337.37 kHz, 因此, 为同时满足 3 个品种的测试要求, 设置激励频率为 338 kHz。

### 2.3 水分检测传感器标定

随机从 871×872、洞庭×碧波、两广二号鲜茧中各取出 1 份样品(约 50 g), 进行水雾喷洒处理, 分别密封后放入 5 °C 冰箱保存 10 h. 取出样品, 利用 JJ1023BC 型电子天平测量样品质量, 分别将样品平铺在下极板上(硅胶护栏内侧), 调节信号发生器输出频率为 338 kHz, 记录采样电压数据后将样品取出, 放入 LPCD-E3000 型恒温烘箱, 在 50 °C 条件下对鲜茧样品热处理 3 min, 再次利用 JJ1023BC 型电子天平测量样品质量, 利用 DSO6034A 型示波器监测回路采样电压, 经过多次 3 min 热处理, 直到鲜茧质量基本不变, 取出蚕蛹, 将茧层烘干至无水恒质量, 称其干壳质量. 记录试验数据如表 2 所示.

表 2 采样电压与茧层含水率试验测试结果

激励频率( $f$ )/ kHz	品种	序号	鲜茧质量( $m$ )/ g	蚕蛹质量( $m'$ )/ g	干壳量( $m_0$ )/ g	采样电压 ( $ V_R $ )/V	茧层含水率( $M_C$ )/ %
338	871×872	1	52.448	38.942	9.665	1.290	28.439
		2	52.340			1.294	27.862
		3	52.263			1.296	27.445
		...	...			...	...
		89	49.538			1.350	8.256
	洞庭×碧波	1	51.985	38.833	9.379	1.294	28.688
		2	51.882			1.298	28.125
		3	51.801			1.300	27.676
		...	...			...	...
		78	49.112			1.352	8.836
	两广二号	1	52.654	39.455	9.432	1.283	28.545
		2	52.550			1.287	27.973
		3	52.542			1.289	27.928
		...	...			...	...
		80	49.795			1.346	8.432

利用 MATLAB 软件, 以  $|V_R|$  为横坐标,  $M_C$  为纵坐标对实验数据进行拟合, 如图 5 所示.

拟合公式为

$$M_C = P_1 |V_R|^2 + P_2 |V_R| + P_3 \quad (6)$$

拟合参数及误差如表 3 所示.

表 3 拟合参数及误差

品种	参 数			和方差 (SSE)	标准差 (RMSE)	确定系数 (R-square)
	$P_1$	$P_2$	$P_3$			
871×872	-3 186	8 076	-5 088	7.212	0.269	0.997
洞庭×碧波	-3 577	9 129	-5 795	5.764	0.245	0.998
两广二号	-3 179	8 034	-5 046	7.761	0.290	0.997

从图 5 及表 3 可以看出, 鲜茧的茧层含水率  $M_C$  在 8%~26% 范围内(自然状况下鲜茧茧层含水率一般为 13%~15%)与采样电压  $|V_R|$  的拟合度较高, 满足 GB/T 19113-2003 中茧层含水率补正规定的测量范围要求.

### 2.4 称质量传感器标定

称质量传感器选用德国 sartorius 的单体式传感器 WZA523-N(量程: 520 g, 精度: 0.001 g, 数据接口: RS232). 利用 M1 级的 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 g 标准砝码及 JJ1023BC 型电子天平(精度 0.001 g)对称质量传感器的输出值进行标定, 先后将砝码放入 JJ1023BC 型电子天平上测量其质量, 以及放入装置中的电容下极板上, 通过串口调试软件检测称质量传感器输出值, 记录数据如表 4 所示.

表 4 称质量传感器标定数据

序号	砝码总质量/g	JJ1023BC 测量值/g	称质量传感器输出值
1	1	1.001	0x31B9
2	2	2.001	0x3237
3	5	5.002	0x33B1
4	10	10.002	0x3627
5	11	11.003	0x36A5
6	12	12.003	0x3723
7	15	15.004	0x389D
8	20	20.003	0x3B14
9	21	21.004	0x3B92
10	22	22.004	0x3C10
...	...	...	...
45	420	420.023	0xFF FF

利用 MATLAB 软件, 以电子天平测量值为横坐标, 称质量传感器输出值为纵坐标对实验数据进行拟合, 如图 6 所示.

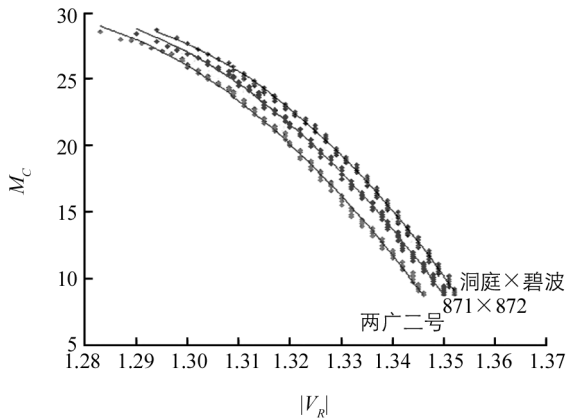


图 5 采样电压与茧层含水率拟合图

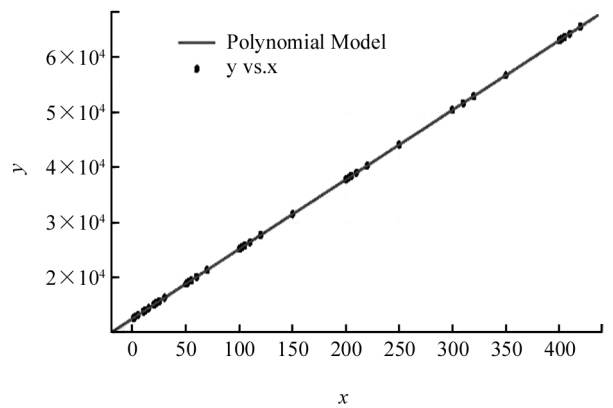


图 6 实测质量与称质量传感器输出值拟合图

拟合公式为

$$y = 126x + 12600 \quad (7)$$

拟合误差如下:

和方差(SSE): 3.69, 标准差(RMSE): 0.304, 确定系数(R-square): 1.

### 3 装置测量误差及分析

分别从 871×872、洞庭×碧波、两广二号鲜茧中各取(约 50 g 左右)10 份样品, 密封后放入 5 °C 冰箱, 采用烘干法测量鲜茧茧层含水率和干壳量, 与采用本文设计的无损快速检测装置测量鲜茧茧层含水率和干壳量进行对比, 数据如表 5 所示.

试验表明, 采用本文设计的无损快速检测装置完成鲜茧茧层含水率与干壳量测量的时间小于 2 min, 而基于 LPCD-E3000 型恒温烘箱进行烘干法测量(茧层不发生质变的温度条件下)的时间大于 3 h. 该装置测量茧层含水率的相对误差小于 0.96%, 测量干壳量的相对误差小于 2.04%. 造成误差的主要原因, 一是鲜茧蚕蛹大小存在个体差异, 因此取样时样品不可能等质量; 二是畸形茧摆放位置的随机性对测量结果有一定影响; 三是对鲜茧热处理不均匀也会对结果有一定影响. 针对以上问题, 今后将做进一步研究改进. 由于鲜茧季节性强, 保存时间短, 本文仅采集了 3 个品种的鲜茧样品, 其他品种鲜茧的试验测试还有待进一步研究.

表 5 烘干法测量与无损快速检测装置测量对比结果

品 种	序 号	烘干法测量				无损快速检测装置测量			相对误差	
		鲜茧质量/ g	蚕蛹质量/ g	干壳量/ g	茧层 含水率/%	鲜茧质量/ g	茧层 含水率/%	干壳量/ g	茧层含水率 相对误差/%	干壳量 相对误差/%
871×872	1	50.138	38.857	9.644	14.511	49.765	14.648	9.448	0.944	2.033
	2	49.847	38.631	9.588	14.511	50.326	14.635	9.492	0.855	1.002
	3	50.336	39.010	9.682	14.510	50.087	14.646	9.515	0.937	1.727
	4	49.789	38.586	9.577	14.511	49.651	14.645	9.428	0.923	1.555
	5	50.361	39.030	9.687	14.512	49.856	14.650	9.509	0.951	1.836
洞庭×碧波	1	49.901	38.923	9.402	14.362	50.327	14.497	9.511	0.940	1.164
	2	50.233	39.182	9.464	14.363	49.621	14.499	9.650	0.947	1.966
	3	50.364	39.284	9.489	14.362	49.577	14.496	9.597	0.933	1.141
	4	49.856	38.888	9.393	14.361	49.723	14.478	9.436	0.815	0.456
	5	49.718	38.780	9.367	14.362	50.285	14.489	9.485	0.884	1.259
两广二号	1	49.869	38.998	9.323	14.247	50.374	14.382	9.218	0.948	1.122
	2	50.384	39.400	9.419	14.247	49.759	14.369	9.236	0.856	1.941
	3	49.527	38.730	9.259	14.248	49.866	14.379	9.215	0.919	0.470
	4	50.074	39.158	9.361	14.246	50.192	14.379	9.262	0.934	1.058
	5	49.652	38.828	9.282	14.247	50.258	14.378	9.117	0.919	1.778

## 4 结 论

本文设计的鲜茧茧层含水率与干壳量无损快速检测装置,能够在不切割鲜茧样品的情况下准确、快速检测出鲜茧茧层含水率与干壳量。

1) 该装置完成鲜茧茧层含水率与干壳量两个物理量检测的时间小于 2 min。

2) 该装置测量鲜茧茧层含水率的相对误差小于 0.96%,测量干壳量的相对误差小于 2.04%。

3) 该装置与《鲜茧茧层含水率与干壳量快速测量研究》中设计的装置相比较,测量鲜茧茧层含水率的相对误差减小了 0.02%,测量干壳量的相对误差减小了 0.16%,检测时间缩短了 3 min 左右。

## 参考文献:

- [1] 柳德康. 蚕茧收烘技术 [M]. 北京: 金盾出版社, 1995.
- [2] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 桑蚕鲜茧分级(干壳量法): GB/T 19113—2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [3] 陈 原. 基于小波包原理的蚕茧无损检测研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 119—123.
- [4] 周国柱, 杨光友, 罗先礼, 等. 基于振动的蚕茧质量智能无损检测 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(1): 17—20.
- [5] 陈 原. 基于振动信号的蚕茧质量无损检测方法 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 91—93.
- [6] 胡兴明, 吴 恢, 叶楚华, 等. 基于神经网络集成的蚕茧干壳量无损检测方法研究 [J]. 蚕业科学, 2008, 34(4): 781—785.
- [7] 罗先礼. 基于虚拟仪器技术的蚕茧无损质量检测研究 [D]. 湖北: 湖北工业大学, 2006.
- [8] 江金鱼. 蚕茧质量无损检测方法的研究 [D]. 湖北: 湖北工业大学, 2008.
- [9] 甘 勇. 蚕茧质量无损检测方法研究 [J]. 丝绸, 2004(5): 19—21.
- [10] 韦荔蕾, 甘 勇, 张应红. 蚕茧质量无损检测实验系统设计及实现 [J]. 丝绸, 2007(1): 22—24.
- [11] 金航峰. 基于光谱和高光谱图像技术的蚕茧品质无损检测研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] 黄凌霞, 吴 迪, 金航峰, 等. 基于变量选择的蚕茧茧层量可见—近红外光谱无损检测 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 231—236.
- [13] 陈植成, 黄庶识, 刘军贤, 等. 傅里叶变换红外光谱技术在茧质检测中的应用 [J]. 丝绸, 2009(1): 31—33.
- [14] 金航峰, 黄凌霞, 谢 琳, 等. 桑蚕鲜茧干壳量的可见/近红外光谱无损检测 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 147—151.

- [15] 饶丽琴. 基于光谱技术的蚕茧品种和品质相关特性数字化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [16] 黄凌霞, 金航峰, 金佩华. 基于可见-近红外光谱的蚕茧含水率无损检测研究 [J]. 蚕桑通报, 2013, 44(4): 31-34.
- [17] 井 伟, 李光林, 宋 杰. 鲜茧茧层含水率与干壳量快速测量研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 158-164.
- [18] CHARI V K, RAO C N R, DANIEL O C. Capacitance Sensor for Nondestructive Determination of Total Oil Content in Peanut Kernels [J]. Journal of Sensor Technology, 2013, 3: 42-46.
- [19] CHARI V K, JAYA S. Nondestructive Measurement of Moisture Content Using a Parallel-Plate Capacitance Sensor for Grain and Nuts [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(7): 1282-1287.
- [20] CHARI V K, STUART O N. RF Impedance Method for Estimating Moisture Content in Small Samples of In-Shell Peanuts [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 938-943.
- [21] CHARI V K, CHRIS L B, STUART O N. Capacitance Sensor for Nondestructive Measurement of Moisture Content in Nuts and Grain [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(5): 1809-1813.
- [22] CHARI V K, NAVEEN P. Parallel-Plate Capacitance Sensor for Nondestructive Measurement of Moisture Content of Different Types of Wheat [C] //Sensors Applications Symposium (SAS), Brescia: 2012: 1-5.
- [23] STUART O N, CHARI V K, KURT C L. Moisture Determination in Single Grain Kernels and Nuts by RF Impedance Measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1992, 41(6): 1027-1031.
- [24] CHARI V K, NAVEEN P. Capacitance Sensors for Nondestructive Moisture Determination in Grain, Nuts and Bio-fuel materials [C] //Sixth International Conference on Sensing Technology, Kolkata: 2012: 42-45.
- [25] CHARI V K, NELSON S O, LAWRENCE K C. Moisture Determination in Single Kernels of Corn-A Nondestructive Method [J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(6): 1890-1895.

## Design and Experiment of a Nondestructive and Fast Detecting Device for Moisture Content of Fresh Silkworm Cocoon Layer and Dried-Shell Weight

SONG Jie, JING Wei, LI Guang-lin,  
LUO Hong-pin, MA Chi

*School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China*

**Abstract:** The quality of fresh silkworm cocoons mainly depends on their moisture content and their dried-shell weight. In an experiment reported in this paper, a method for measuring moisture content of fresh cocoon layer based on LC oscillator circuit was developed. A hardware system for nondestructive testing of the moisture content and the dried-shell weight was set up. The moisture sensor was calibrated by the fresh cocoons of three silkworm varieties (871×872, DONGTING×BIBO and LIANGGUANG No. 2). The weighing sensor was calibrated by standard weights of M1 and the JJ1023BC electronic balance and, based on this, the software system was designed. The results showed the relative error for detecting moisture content of cocoon layer was less than 0.96%, and the relative error for detecting dried-shell weight was less than 2.04%. The detection time for this device was less than 2 min. It is, thus, concluded that we can evaluate the quality of fresh silkworm cocoons fast and nondestructively with this device whose cost is quite low.

**Key words:** fresh cocoon; moisture content of cocoon layer; dried-shell weight; nondestructive; fast detecting

