基于 MSP430 微处理器的剩余电压测量装置的研制

蔡永华，程丽玲，徐哲谆

（浙江出入境检验检疫局，浙江 杭州 310020）

[摘要] 根据相关电气产品安全标准的要求，提出一种符合低测量误差剩余电压的测量方法，并根据该测量方法研制了一台测量仪器。对该测量法在实际应用中的几个关键点进行了分析，并结合 MSP430F149 微处理器提出硬件和软件设计的实现方案，最后对该测量装置加以验证，证明测量装置有效可行。

关键词 家用电器 剩余电压 测量方法 测量装置 MSP430

0 引言

在电气产品的认证中，产品符合安全标准的同时也要符合电磁兼容要求，随着家用电器电子化进程不断加深，企业为了提高产品的电磁干扰性能，会在产品中放置 X 电容、Y 电容或者 EMI 滤波器以满足电磁兼容认证需要，然而这些储能元件的广泛使用，会导致电气产品在切断供电电源后因储能元件而存在电能，这部分能量若不能得到有效释放，将导致电击危险甚至会引起火灾等，为此各类产品的安全标准[1~4]也越来越关注这部分能量的释放问题。本文分析了这些剩余电压测量误差产生的原因，进而提出了一套比较合理的测试方法，结合最新的单片机、电子技术测量技术和数字信号处理理论，对测量装置展开研究，提出了剩余电压测量装置研制中的几个关键点，并提出了硬件和软件的解决方案，在此基础上研制出一台科学的、低误差的剩余电压测试装置。

1 测试仪器输入阻抗对剩余电压测量影响分析

剩余电压是由储能元件的残余能量引起的，其能量是有限的，因此归纳起来有 2 个特征：(1)自我衰减性，剩余电压会因放电回路存在而逐渐趋向于零；(2)不稳定性，会受到测量仪器的接入阻抗构成放电回路而影响到测量精度。目前常用的剩余电压测量方法为示波器监测法，即当电源断开后，把示波器探头接到被测器具的插脚上，通过示波器记录波形再读出标准规定时间时的电压值。当被测样品在峰值被断开后，由于示波器的探头并联于被测样品上，构成了额外的放电回路，电容的放电公式如下：

$$U(t) = U_0 e^{\frac{-t}{\tau}} \tag{1}$$

其中 $\tau = RC$，R 为放电回路的等效阻抗，C 放电回路的等效电容，$U(t)$ 为电容电压变化曲线。

当探头接入回路后，探头阻抗接入放电回路，影响放电回路的等效阻抗 R 从而影响 $U(t)$ 曲线，进而影响 $U(1)$、$U(2)$ 和 $U(10)$ 等测量结果。为了说明测量仪器的阻抗对测量结果产生的影响，我们做了输入阻抗和测量结果的比对实验，便于分析比对，选择 0.22μF 的理想 X 电容作为被测样品，当电源断开后，分别用输入阻抗为 10MΩ 和 66.7MΩ 2 个示波器探头进行剩余电压测试，对于理想的 X 电容，若无额外的放电回路接入，放电回路等效阻抗为无穷大，则放电时间常数为无穷大，因此可以推断剩余电压测量结果 $U(1) = U(2) = U(10) = U_0$，但是由于测量探头的接入改变了电路的时间常数，10MΩ 和 66.7MΩ 探头的时间常数分别为 2.2s 和 14.67s。根据式(1)计算和实际测量，表 1 给出了 2 个不同阻抗探头测量时的理论值和实测值，图 1 给出了被测样品在不同阻抗探头下，所测得的不同剩余电压曲线。

表 1 考虑测量探头阻抗影响时，理论值和实测值比较

被测样品	探头阻抗	断开时样品上的电压及理想剩余电压结果/V	考虑探头阻抗影响时 断电 1s 时，被测样品上的电压值/V		断电 2s 时，被测样品上的电压值/V		断电 10s 时，被测样品上的电压值/V	
			理论值	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值
0.22μF 的理想 X 电容	10MΩ	318.0	201.8	200.0	128.2	126.7	3.37	4.3
	66.7MΩ	319.2	298.2	297.2	278.5	276.7	161.5	161.4

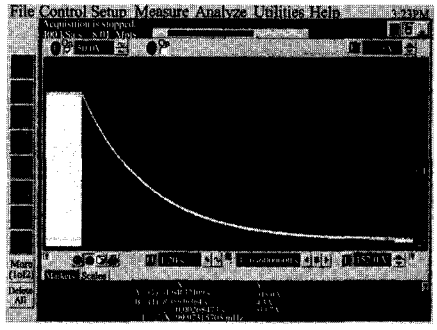
上述的测量结果和电路说明：示波器监测法的剩余电压测量值会受探头的输入阻抗的影响，并且随着输入阻抗的减少及延时时间的增加而增大。用示波器监测法测量剩余电压时，若要达到标准要求，必须把输入阻抗增加到一个可以忽略影响的程度。但探头的输入阻抗不能无限地增加，这给剩余电压的测量精度带来了致命的影响。

2 装置设计思路

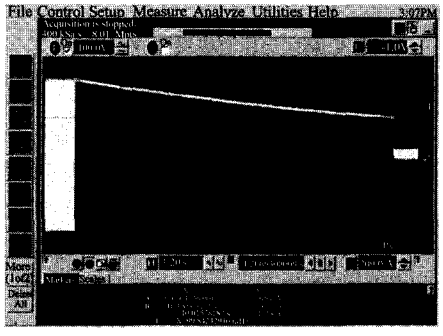
为了解决示波器监测法的弊端，减少测量仪器输入阻抗对测量结果的影响，提出了“无穷阻抗直线拟合测量法”，其测量原理如图 2 所示。工作原理如下，在残余电压测量之前，电子开关处于导通，电源继电器 Relay1 闭合，测量继电器 Relay2 断开，器具 EUT 处于正常供电状态；当控制系统接到测量命令时，相位监测电路启动，当捕获到电源电压峰值时，

收稿日期：2008-07-29

作者简介：蔡永华（1978-），硕士，工程师，主要从事电气产品测试和认证的研究。



(a)输入阻抗为 10MΩ 探头测量曲线



(b)输入阻抗为 66.7MΩ 探头测量曲线

图 1 不同的探头输入阻抗的测量曲线

驱动电子开关保证电源从峰值断开，同时驱动电源继电器 Relay1 断开，保证电源与 EUT 完全断开，此时启动定时器开始记录电源断开后的时间，当达到设定延时值(GB4706.1-2005 规定值为 1s、GB8898-2001 规定值为 2s、GB4793.1-2007 规定值为 10s)，驱动测量继电器 relay2 闭合，测试单元开始测量器具插脚间的残余电压。

无穷阻抗测量法保证了在断开电源后的延时期间在插脚上没有任何测量电路，在延时期间阻抗为无穷大，有效的避免了示波器监视法的探头接入造成的测量误差，另外当测试单元接入器具插脚后，瞬时读数即为测量结果，测量单元的输入阻抗对于测量结果没有误差累积效应，可以采用输入阻抗较低的测量单元，试验表明测量回路输入阻抗大于 1MΩ 即满足要求。

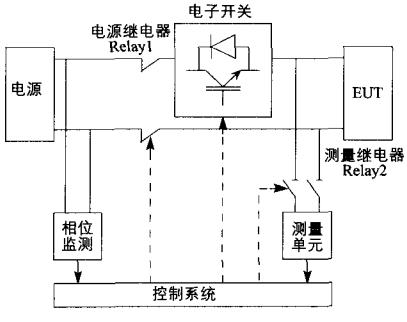


图 2 测量原理示意图

然而剩余电压测量的步骤较为复杂，因此影响剩余电压测量结果因素较多，首先是电源电压的品质，若波峰因数或者 THD 指标不符合要求，电源电压的峰值点难以确定，电子开关断开时储能元件上的初始电压就会有很大的不确定性，剩余电压测量结果也必将会有很大的影响，因此对于电源的品质必须要加以监控；其次，延时时间精度，这个时间是储能元件的放电回路的衰减时间，放电时间的长短显然会影响剩余电压的大小；最后测量单元的测量算法响应速度等都会直接影响测量结果。在测量装置的研制中，有必要注重这些关键环节的设计以保证剩余电压的测量精度。

3 误差控制关键点分析和设计要求

上述的众多因素中，由于目前使用的微处理器晶振频率高且温漂小，时间精度不是问题，只要对继电器的动作延时作适当补偿，即可满足要求，而电源品质和测量算法是设计关键点。

3.1 电源电压品质的监测和控制

为了对测试供电电源提出品质要求，先对电源电压误差传递到测量结果的过程进行分析。根据式(1)，对于给定的被测电路和检测标准，t 和 τ 都是给定的，因此理论的剩余电压值与电子开关断开时的初始电压成正比。要求测试装置能够在 20～50V 之间，测量的误差要小于 1V(考虑 GB4706.1-2005 中要求剩余电压不超过 34V，因此要确保 34V 附近的电压测量精度)，那么由电容放电公式，U_0 的波动幅度要小于 $220\times1.414/50=6.22$V。

由于电网电压的峰值 U_0 受很多因素影响，结合 GB17625.1-2003[5] 谐波测试对电源的要求，对剩余电压测量电源的品质及测量电路作以下规定：

(1) 电源电压测量单元的仪表精度要不低于 0.2 级；

(2)电源的有效值波动不大于 1%，峰值波动不大于 2%；

(3)电源的总谐波畸变 THD 小于 1%；

(4)电源电压的峰值因数在 1.40～1.42 之间；

(5)电源电压的峰值点应该在过零点后的 87°～93° 出现。

3.2 剩余电压值获取算法

测量回路输入阻抗会对剩余电压的测量带来致命的影响，为了能够准确的测量，测量单元完成测量必须要快速，然而测量电路稳态的建立需要时间且其过渡过程会产生电磁骚扰，同时测量电路的输入阻抗会影响剩余电压的衰减曲线等众多因素促使运用简单的采样计算会导致不确定度增大而影响测量的可靠性，为此提出了“直线拟合测量法”用以解决剩余电压的获取问题。该测量方法的原理简述如下：

当测量继电器闭合后，测量单元在随后的 2ms 内进行快速等间隔采样，采样结果为 Y 序列（Y_1，Y_2，…，Y_N），电路理论表明剩余电压的衰减符合指数衰减规律，为了简化算法，假设在较短的测量时间内剩余电压的衰减符合直线衰减规律（大量的试验结果表明在 2ms 内把指数衰减等效为直线衰减是可行的）。

则有被测剩余电压序列符合 $U_i = a \cdot i + b$，其中 a 和 b 是待定常数，U_i 为剩余电压待求序列。

根据最小二乘法原理[6]，使 $F(a, b) = \sum_{i=1}^{N} \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{N} (Y_i - a \cdot i - b)^2$ 为最小，由极值原理得 $\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial b} = 0$，即

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial a} = -2\sum_{i=1}^{N} i \cdot (Y_i - a \cdot i - b) = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial b} = -2\sum_{i=1}^{N} (Y_i - a \cdot i - b) = 0 \end{cases} \tag{2}$$

解此联立方程得

$$\begin{cases} a = \dfrac{N \cdot \sum_{i=1}^{N} i \cdot Y_i - \sum_{i=1}^{N} i \cdot \sum_{i=1}^{N} Y_i}{N \cdot \sum_{i=1}^{N} i^2 - (\sum_{i=1}^{N} i)^2} \\ b = \dfrac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} Y_i - \dfrac{a}{N} \sum_{i=1}^{N} i \end{cases} \tag{3}$$

通过式(3)可求得常数 a 和 b，进而求得 U_i，U_1 即为所求的剩余电压测量值。但是为了剔除由干扰引起的测量偏差，依据 U_i 对每一个采样点 Y_i 进行重新评估，若满足 $|Y_i - U_i| \geqslant \delta$（其中 δ 为限定的采样最大误差值），则认为该点无效并剔除，新的 Y_i 通过线性插值法求得 $Y'_i = \frac{Y_{i-1} + Y_{i+1}}{2}$，对采样序列整理后，重新用最小二乘法直线拟合计算，总结上述算法流程如图 3 所示。

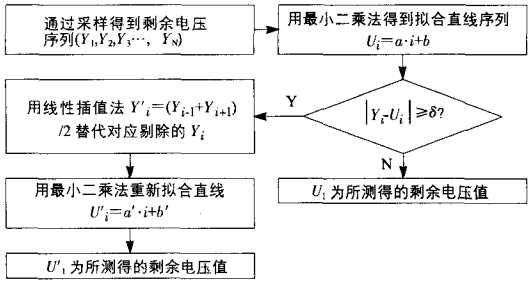


图 3 剩余电压获取算法流程

4 剩余电压测量装置的实现

剩余电压测量装置的控制系统以 MSP430F149 处理器为核心，配备高精度的模拟输入电路，高速度的输出驱动电路，以测量的快速准确要求，并配备了输入键盘和液晶显示屏保证了人机交互的友好性。测量装置的原理框图如图 4 所示。

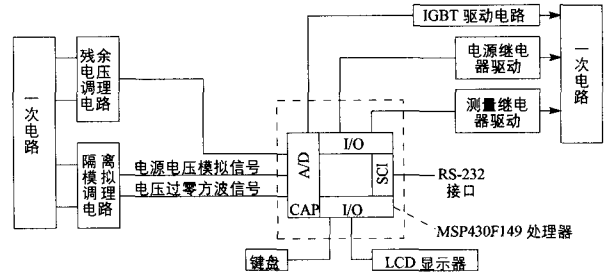


图 4 剩余电压测量装置原理框图

隔离传感器把剩余电压的测试电源和测量控制电路分离后，通过两路信号进入处理器，一路通过模拟调理电路后通过 A/D 输入口进入，处理器对该信号进行分析，当不符合电源电压要求时对电源报错；另外一路通过带通滤波器和比较电路后成为与过零点同步的方波信号，通过捕获口进入，处理器在每个电源周期获得一个电源正向过零中断，当执行剩余电压测量时，处理器根据电源的正向过零时刻延时 90°来确定电源电压的峰值，通过 I/O 驱动电子开关迅速切断电源，保证电源在峰值断开，此时切断电源继电器，处理器启动延时定时器；延时定时器中断后，测量继电器闭合，处理器通过剩余电压调理电路读取电压值。

根据剩余电压装置的功能要求以及硬件电路结构，该装置的主程序流程如图 5 所示，部分中断程序如图 6 所示。

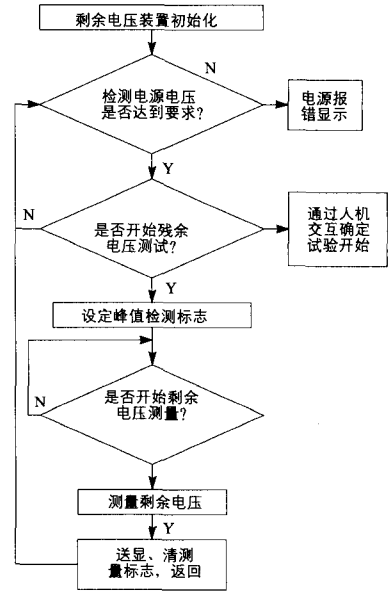


图5 主程序流程

剩余电压测试流程分别经捕获中断、峰值定时中断和延时定时中断分解后，使得主程序的控制和流程变得相当简单，有利于程序的实现和系统的可靠性。

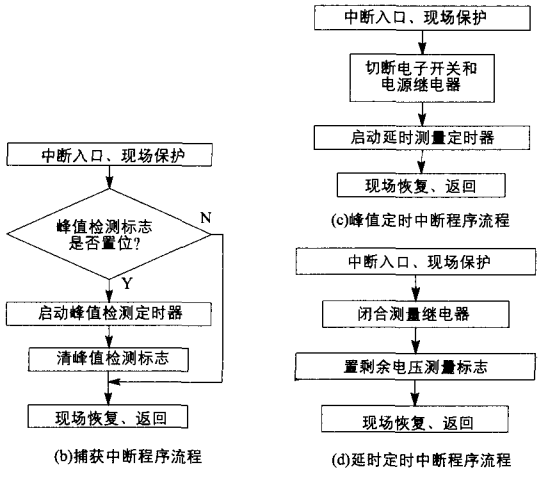


图 6 剩余电压测量装置软件流程图

5 结束语

按照上述方法，完成了剩余电压测量装置的样机，并制作了 2 个模拟的被测器具，其电参数如下 EUT1：$C=0.68\mu F$，$R=1.58M\Omega$，RC 并联 EUT2：$C=0.68\mu F$，$R=5.96M\Omega$，RC 并联。

根据阻容放电公式，可求得电压随时间衰减的理论变化规律，同时用研制测量装置对模拟器具进行剩余电压的多次测试，其结果如表 2 所示(理论计算和测试电源参数均为 220V，50Hz)。

表 2 剩余电压测量数据与理论值比较

被测 EUT1 参数	延时时间/s	理论计算/V	第 1 次测量/V	第 2 次测量/V	第 3 次测量/V	第 4 次测量/V
$C=0.68\mu F$	1	122.6	123.6	121.4	122.5	122.1
$R=1.58M\Omega$	2	48.3	46.9	48.1	48.1	48.2
RC 并联	10	0.028	0.24	0.18	0.42	0.52
被测 EUT2 参数	延时时间/s	理论计算/V	第 1 次测量/V	第 2 次测量/V	第 3 次测量/V	第 4 次测量/V
$C=0.68\mu F$	1	243.0	242.5	241.8	241.5	243.0
$R=5.96M\Omega$	2	189.9	188.9	189.5	190.1	190.4
RC 并联	10	26.4	24.9	25.4	25.4	27.1

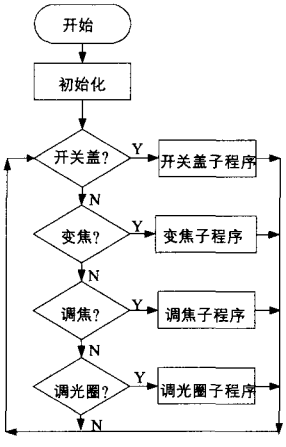
表 2 给出的试验结果证明，基于 MSP430 的剩余电压测量装置有效可行。

参考文献

[1]GB4706.1-2005.家用和类似用途电器的安全 第 1 部分：通用要求
[2]GB8898-2001.音频、视频及类似电子设备安全要求
[3]GB4943-2001.信息技术设备的安全
[4]GB4793-2007.测量，控制和实验室用电气设备的安全要求.第 1 部分：通用要求
[5]GB17625.1-2003.电磁兼容、限值、谐波电流发射限值(设备每相输入电流≤16A)
[6]郑宝玉，等译.自适应滤波器原理.第四版.西安：电子工业出版社，2006，11

(上接第 61 页)

化。主程序，定时器冲断服务程序流程图分别如图 2、3 所示。



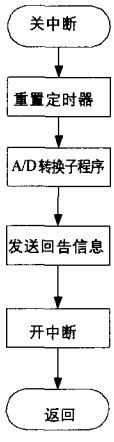


图 2 系统主程序流程图　图 3 定时器 0 中断服务程序流程图

在主程序中，首先完成定时器初始化，串口初始化，焦距位置初始化，光圈位置初始化等工作，然后进入主循环，主循环不断判断主控计算机发出的控制指令类型，并调用 4 个相应的子程序。为了提高软件的抗干扰能力，防止程序跑飞，利用了单片机的看门狗功能，一旦程序跑飞，看门狗可以使系统复位，从而提高了软件的可靠性。需要注意的是，在实际调试过程中，在系统上电的瞬间，由于系统还没有达到稳定状态，有时偶尔产生镜头盖误动作等情况，为了避免这一情况，后来在程序初始化时加入了 5s 左右的延时程序，目的是待整个系统稳定后再进入主循环，这样就很好地解决了上电时的误动作现象。

在定时器 0 中断程序里，主要完成焦距位置，光圈位置的实时采样，经 MAX1270 进行 A/D 变换，数字滤波后存入缓冲区供主程序读取。另外此中断程序还完成发送相应的回告信息的任务。

4 结束语

经实际使用证明，该控制系统成本低廉，可靠性高，运行稳定，且通用性好，可以在类似产品的电视传感器镜头控制中推广应用。

参考文献

[1]胡汉才.单片机原理及系统设计.清华大学出版社，2002.41～42
[2]潘新民.微型计算机控制技术.电子工业出版社，2003.47～48
[3]余永权，汪明慧.单片机在控制系统中的应用.电子工业出版社，2005.203～206