

## 多种检波方式的智能电压表设计与实现\*

千承辉 宾康成 张汉良 宋继斌

(吉林大学仪器科学与电气工程学院 长春 130026)

**摘要:** 所设计的智能电压表采用3种检波方式,实现了对直流电压和任意周期性交流信号其峰值、有效值和平均值的测量,且检测过程实现量程切换自动化。在软件中加入去极值平均滤波算法,滤除了明显的毛刺并抑制了小幅度随机噪声,提高了测量准确度。该表的可测信号频率范围为1 Hz~1 MHz,幅度范围为0.1~10 V,测量结果的真值相对误差小于 $\pm 1\%$ 。此电压表具有体积小、重量轻和便于携带的优点,在电压信号测量中极大地扩充了市面数字万用表的功能。

**关键词:** 智能电压表;峰值检波;有效值检波;平均值检波;宽频带;去极值平均滤波

**中图分类号:** TM933.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## System design of a smart voltmeter with multi-demodulations

Qian Chenghui Bin Kangcheng Zhang Hanliang Song Jibin

(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** Based on three demodulations, this smart voltmeter is capable of the automatic measurement of peak value, effective value and average value of direct voltage and any periodic AC signals. By applying excluding extreme value averaging filter algorithm, the voltmeter provides better resistance to burrs and low amplitude random noise, which as a result, improved the systematic accuracy. The voltmeter input frequency is ranging from 1 Hz to 1 MHz, with an amplitude range from 0.1 V to 10 V and a relative error less than  $\pm 1\%$ . With its tiny size and light weight, this voltmeter drastically promoted the function upgrade of digital multimeter products on the market.

**Keywords:** smart voltmeter; peak detection; RMS detection; average detection; wideband; excluding extreme value averaging filter

## 1 引言

在现代电子测量中,常需用数字万用表进行现场检测<sup>[1-2]</sup>。目前,市面数字万用表的交流电压档采用平均值检波原理,只能测量不失真正弦波信号,且工作频带窄(40 Hz~10 kHz)<sup>[3-4]</sup>。检波波形、检波方式和工作频带的限制,影响了数字万用表的使用范围。为了更加全面地获得电压信号的信息,交流电压的测量应该实现峰值、有效值和平均值的检波功能<sup>[5-7]</sup>。

本文所设计的电压表采用峰值、有效值和平均值检波电路的方式,在软件中加入数字滤波算法,实现了对任意周期性交流信号的高精度测量。智能电压表的工作频带较之数字万用表大幅提升,可达1 MHz,其测量结果的真值相对误差小于 $\pm 1\%$ ,且测量过程实现自动化。

## 2 系统总体设计

系统的整体设计方案如图1所示,其主要由保护电路、信号调理模块、峰值检波电路、有效值检波电路、平均值检波电路、A/D、ARM处理器、LCD及电源模块等部分构成。

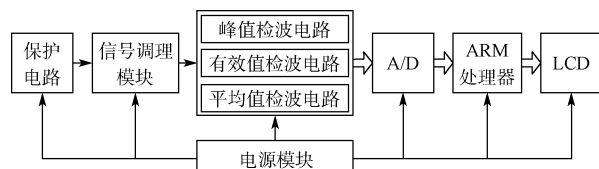


图1 系统总体框图

为防止输入信号过大损坏系统,待测信号首先经过保护电路;信号调理模块包括电压跟随器、低通滤波器及程控

放大电路,放大或衰减的倍数由被测信号的峰值决定,实现测量过程的自动化;调理后的信号经峰值检波电路、有效值检波电路和平均值检波电路后转换为对应模拟信号,模拟信号经 A/D 转换后存入系统内存;处理器对电压采样值进行数字滤波处理,并将数字滤波后的峰值、有效值和平均值显示在 LCD 中;整机采用蓄电池供电,具有使用便携性。

### 3 系统硬件设计

#### 3.1 峰值检波电路

图 2 是峰值检波电路原理图。输入电压未达到峰值时,二极管  $D_1$  关断、 $D_2$  导通,信号通过前运放  $A_1$  对保持电容  $C_1$  充电,由于  $D_1$  的关断,后运放  $A_2$ 、电阻  $R_1$  和  $D_2$  构成一个反馈通路,使得前运放  $A_1$  的输入端之间保持“虚短”,又由于“虚断”使得  $R_1$  上没有电流流过(电压为 0 V),可视为短路。 $A_1$ 、 $A_2$  构成跟随器,使  $A_2$  的输出电压跟随于  $A_1$  的输入电压。

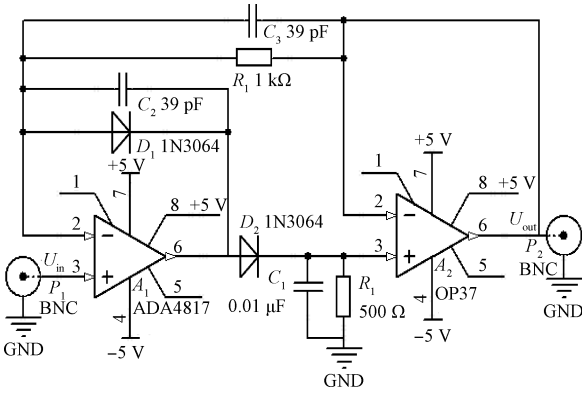


图 2 峰值检波电路原理

当输入电压达到峰值后, $A_1$  的输出电压变小。当电压小于保持电容  $C_1$  上电压时, $D_1$  导通、 $D_2$  截止<sup>[8]</sup>。由于保

持电容  $C_1$  无放电回路,所以  $U_{c1}$  保持输入信号的峰值,又由于后运放  $A_2$  的“虚短”, $U_{out} = U_{c1}$ ,从而实现了信号峰值的检测。

为了维持  $A_1$  的稳定及减小  $A_1$  的输入失调电流造成的影响,故在  $R_1$  和  $D_1$  上并联一个 39 pF 的电容。在  $A_1$  的反馈路径上接入后运放  $A_2$  和二二极管  $D_2$ ,消除了由后运放  $A_2$  的输入失调电压和  $D_2$  上的导通压降所引起的误差。因被测信号频带范围为 1 Hz~1 MHz,峰值检波电路的前运放  $A_1$  须有足够大的压摆率和足够强的电容驱动能力,以起到捕获电压峰值的作用。为避免前运放  $A_1$  工作在非线性区,选择 ADI 公司生产的低噪声、1 GHz FastFET 运算放大器 ADA4817 作为前运放  $A_1$ 。ADA4817 的 -3 dB 带宽为 1 050 MHz,压摆率为 870 V/ $\mu$ s,完全满足本电路设计的需要。

后运放  $A_2$  须有较高的输入阻抗,在保持电容  $C_1$  和输出之间起缓冲作用,防止通过  $R_1$  和负载所引起的放电,故选择 OP37 作为后运放  $A_2$ 。二极管选用结电容小于 1 pF、反向恢复时间为 4 ns 的快速恢复二极管 1N3064,从而保证高频信号的峰值检测。

#### 3.2 有效值检波电路

根据电压有效值定义公式:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1)$$

电压有效值的检测原理如图 3 所示。其主要由平方器、积分器和开方器组成,故可利用模拟运算电路实现对电压有效值的检测。其具体检测电路如图 4 所示。

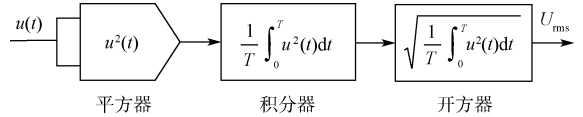


图 3 有效值测量结构

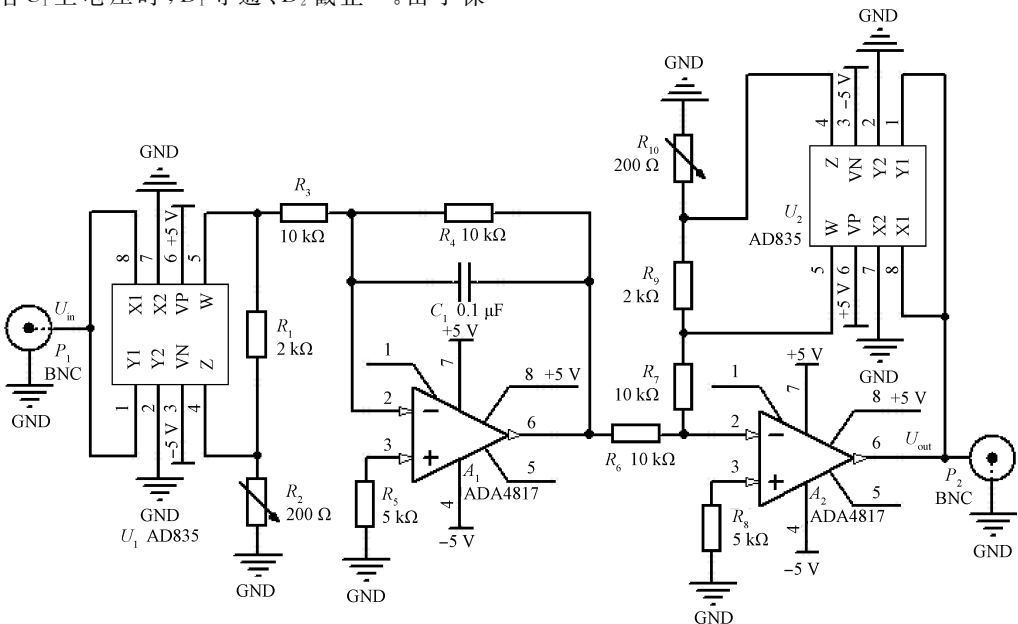


图 4 有效值检波电路原理

首先利用乘法器实现平方运算,使其输出为  $u^2(t)$ ;然后利用放大器组成的积分电路实现对时间的平均;最后由运放和乘法器组成的开方电路对积分器的输出进行开方运算,输出端的电压值即为信号的有效值<sup>[9]</sup>。

乘法器选择 ADI 公司生产的低噪声、电压输出型模拟乘法器 AD835,其乘积噪声仅为  $(50 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}})$ ,  $-3 \text{ dB}$  输出带宽为  $250 \text{ MHz}$ , 满量程的  $0.1\%$  建立时间仅  $20 \text{ ns}$ , 适

合高速乘法、除法、平方运算,完全满足本系统宽频带、小信号的设计要求。

### 3.3 平均值检波电路

在电子测量中,电压的平均值是指检波后的平均值,即全波平均值,因此信号需先经全波整流电路进行绝对值变换,再用滤波器选出其直流分量,从而实现电压平均值的检测<sup>[10]</sup>。具体电路如图 5 所示。

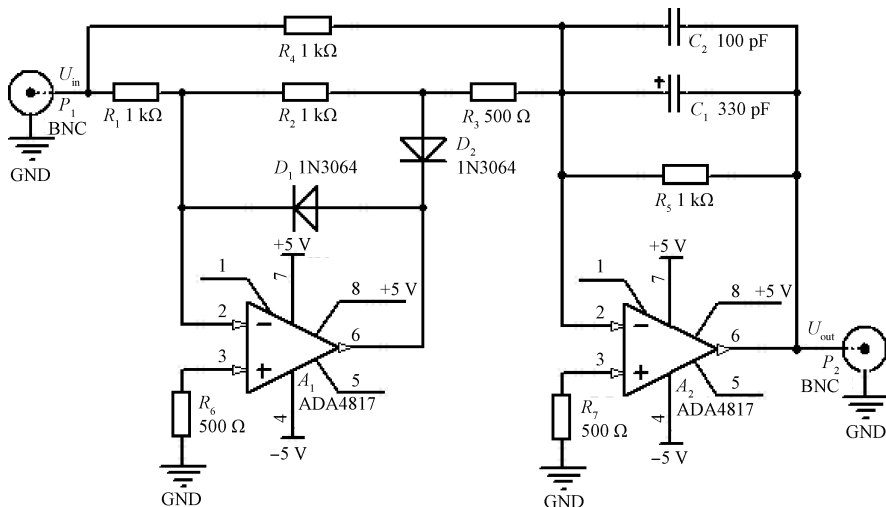


图 5 平均值测量电路图

$A_1$  构成半波检波电路,对于正极性信号,  $D_1$  截止、 $D_2$  导通,  $A_1$  的输出电压为  $-2U_{in}$ ; 对于负极性信号,  $D_1$  导通、 $D_2$  截止,  $A_1$  的输出电压为  $0$ 。

运放  $A_2$  构成反向求和电路,使得  $U_{out} = -(U_{in} + U_{A1})$ , 即  $U_{out} = |U_{in}|$ , 实现全波整流。在运放  $A_2$  的反馈电阻  $R_5$  端并联一个  $330 \mu\text{F}$  和一个  $100 \text{ pF}$  的电容, 构成平均值滤波器, 使  $U_{out}$  与  $|U_{in}|$  的平均值成正比, 以此实现信号平均值的检测。

## 4 软件算法优化

为避免外部大幅度脉冲的干扰和串入仪表的随机干扰所引起的测量误差, 需对模数转换后的数据进行有效的数据处理。本文使用非线性滤波算法中的去极值平均滤波算法, 旨在有效克服因外部偶然因素引起的突变干扰和 A/D 量化噪声等小幅度高频电子噪声。去极值平均滤波算法流程如图 6 所示。

去极值平均滤波算法为: 连续采样  $N$  次, 剔除其最大值和最小值, 最后求取余下  $N-2$  个数据的算数平均值<sup>[11]</sup>。图 6 中  $S_i$  为第  $i$  次采样值,  $A$  为滤波算法的最终有效数据。

以固纬公司 AFG-2225 信号发生器输出的频率为  $1 \text{ kHz}$ , 幅度范围为  $0.1 \sim 10 \text{ V}$  的正弦波信号为基准源, 分别测试加入滤波算法前后的测量准确度, 准确度由真值相对误差反映。测试结果如图 7 所示, 其中虚线表示加入滤

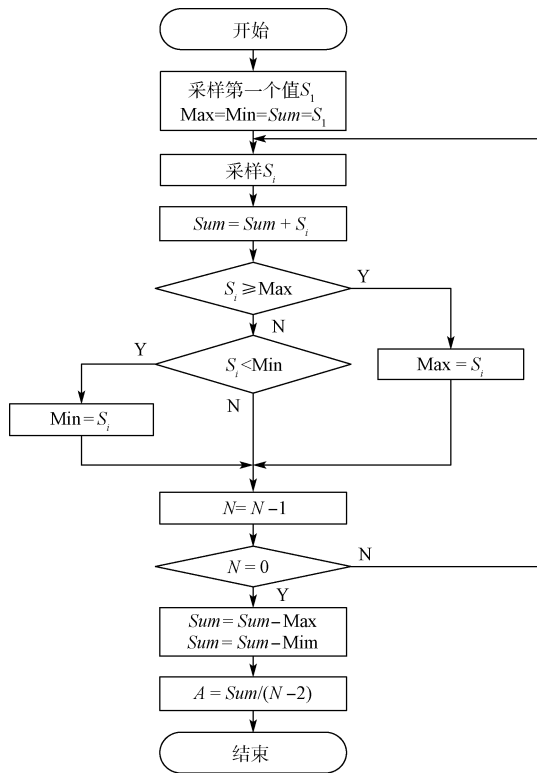


图 6 去极值平均滤波程序流程

波算法前的测量相对误差, 实线表示加入滤波算法后的测

量相对误差。

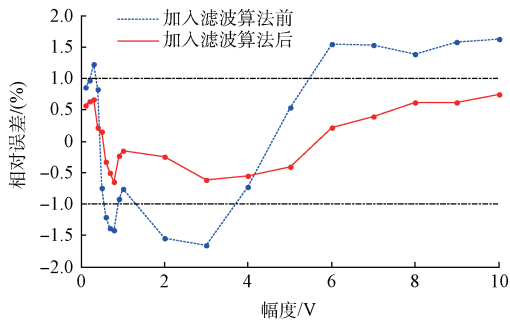


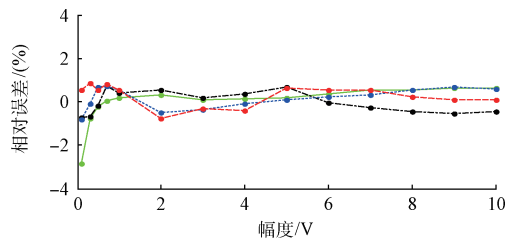
图 7 加入去极值平均滤波算法前后真值相对误差对比曲线

从图 7 中可看出:加入滤波算法前测试结果的真值相对误差小于±2%,加入滤波算法后测试结果的真值相对误差均小于±1%。由测试结果可得出:去极值平均滤波算法滤除了明显的毛刺并抑制了小幅度随机噪声,从而减小了测量的随机误差,提高了测量结果的准确度。

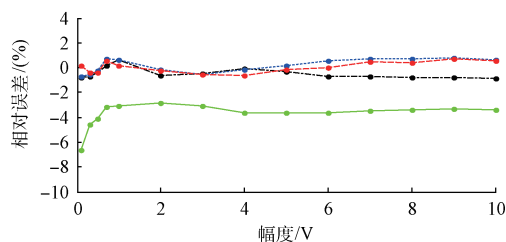
### 5 系统总体测试

系统测试使用固纬公司 AFG-2225 信号发生器产生测量基准源,其测量结果与胜利公司 VC890D 高精度数字万用表的交流电压档的测量结果进行比较,测试结果均由真值相对误差表示。

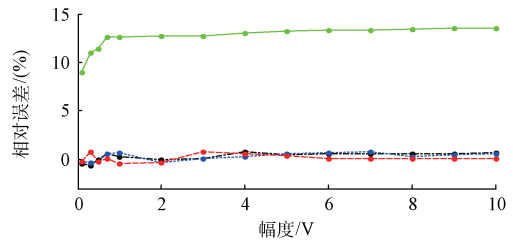
图 8 中(a)、(b)和(c)分别是对频率为 1 kHz,幅度范围为 0.1~10 V 的正弦波、三角波和方波信号做出的测试曲线,从图中可看出,数字万用表的交流电压档只能对正弦波做出准确检测,并且只能测得信号的有效值。而本文所设计的电压表可对任意周期信号的峰值、有效值和平均值做出准确检测,且测量结果的真值相对误差均小于±1%。



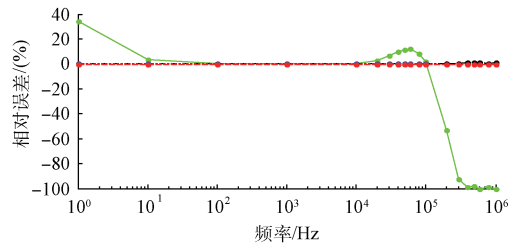
(a) 1 kHz正弦波信号测试数据对比曲线



(b) 1 kHz三角波信号测试数据对比曲线



(c) 1 kHz方波信号测试数据对比曲线



(d) 频率特性测试数据对比曲线

— 数字万用表检测      - - - 本电压表峰值检测  
 ····· 本电压表有效值检测      - - - 本电压表平均值检测

图 8 (a) 1 kHz 正弦波信号测试数据对比曲线; (b) 1 kHz三角波信号测试数据对比曲线; (c) 1 kHz 方波信号测试数据对比曲线; (d) 频率特性测试数据对比曲线

图 8(d)是对幅度为 1 V,频率为 1 Hz~1 MHz 的正弦波信号做出的测试曲线,从图中可以看出:数字万用表的交流电压档检波频带窄,只能对 40 Hz~10 kHz 的信号做出准确检测,而本文所设计的电压表有着良好的频率特性,其可对 1 Hz~1 MHz 的信号做出准确检测,且测量结果的真值相对误差均小于±1%。

### 6 结 论

本文所设计的智能电压表可测量任意周期性交流信号的峰值、有效值和平均值,工作频带为 1 Hz~1 MHz,可测信号幅度范围为 0.1~10 V,测量过程全自动化,测量结果的真值相对误差小于±1%。与数字万用表相比,其显著提高了检波频带,增加了检波方式,扩展了检波波形,可更全面的反映电压信号的特性,且其具有性能稳定、实用性强、体积小、重量轻、便于携带等优点。

### 参考文献

- [1] 刘明亮,朱江森. 数字信号处理对电子测量与仪器的影响研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014,29(10): 1041-1046.
- [2] 熊俊军,黄华,郭克勤,等. 传递过电压测量装置的测控软件[J]. 仪器仪表学报,2013,34(S1):121-125.
- [3] MARUYAMA M, IWASA A, YAMAMORI H, et al. Development of zener calibration system using 10 V programmable Josephson voltage standard atNMIJ[C]. Proceedings of CPEM,2014:260-261.

(下转第 140 页)