

文章编号:1005-2615(2001)05-0490-05

# 一种新型RLC数字电桥的研究

李念强 刘亚 经亚枝 张焕春

(南京航空航天大学自动化学院 南京,210016)

**摘要** RLC数字电桥是一种以微处理器为基础的自动测量电阻 $R$ 、电感 $L$ 、电容 $C$ 、品质因数 $Q$ 、损耗角正切值 $D$ 等参数的智能元件参数测量仪器。该RLC数字电桥,利用DDS(直接数字频率合成)方法,产生波形好,幅值稳定的正弦波,作为测试激励信号;采用了基于 $V-I$ 法的自由轴法测量原理和五端测量技术;相敏检波器设计方法独特,利用数字鉴相,提高了鉴相精度;积分式A/D转换器设计方法新颖,转换精度高。

**关键词:** 直接数字频率合成; 数字电桥; 自由轴法; 数字鉴相法

**中图分类号:** TM 930.1; TP 216+.1

**文献标识码:** A

## 引言

RLC数字电桥是专门测量分立元件参数 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 的仪器,测量方法主要有三种:电桥法,谐振法,伏安法。电桥法具有较高的测量精确度,但需要反复进行调节,测量时间长,不宜进行快速的自动测量。谐振法要求有较高频率的激励信号,一般不容易满足高精度测量的要求。由于测试频率不固定,测试速度很难提高。伏安法借助于微处理器得到了广泛的应用。伏安法有固定轴法和自由轴法两种,固定轴法对硬件要求很高并且存在同相误差,已很少使用,而自由轴法借助于微处理器在RLC元件参数测量中得到了广泛的应用。自由轴法RLC测量原理<sup>[1]</sup>如图1.2所示。

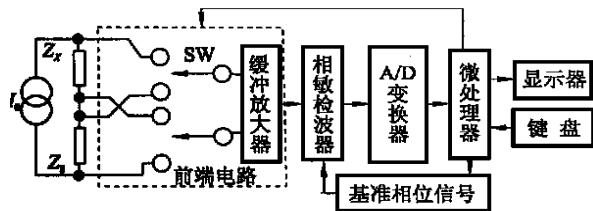


图1 RLC数字电桥原理框图

## 1 自由轴法测量原理

自由轴法中被测阻抗 $Z_x$ 两端的电压 $U_x$ 与标准阻抗 $Z_s$ 两端的电压 $U_s$ 的关系可用图2表示。可见,只要分别测得 $U_x$ 、 $U_s$ 在直角坐标轴上的两个

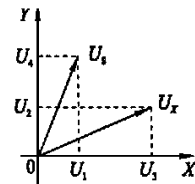


图2 自由轴法矢量图

投影值,代入式(1)即可求得被测阻抗 $Z_x$

$$Z_x = \frac{U_x}{U_s} \times Z_s = \frac{U_1 + j U_2}{U_3 + j U_4} Z_s = \frac{eN_1 + j eN_2}{eN_3 + j eN_4} Z_s \quad (1)$$

式中, $e$ 为A/D转换器的刻度系数,即每个数字所代表的电压值; $N_i$ 为 $U_i$ 对应的数字量( $i=1,2,3,4$ ),其中, $N_i$ 是 $U_i$ 通过积分式A/D转换器而得到的。以电容并联电路的测量为例,推导诸被测参数的数学模型。在图2中 $Z_s$ 一般采用标准电阻 $R_s$ ,根据式(1),则有

$$Y_x = G_x + j\omega C_x = - \frac{U_s}{U_x} \times \frac{1}{R_s} = - \frac{1}{R_s} \left[ \frac{N_1 N_3 + N_2 N_4}{N_1^2 + N_2^2} + j \frac{N_1 N_4 - N_2 N_3}{N_1^2 + N_2^2} \right] \quad (2)$$

收稿日期:2000-10-26; 修订日期:2001-01-05

作者简介:李念强,男,博士研究生,1970年2月生;刘亚,男,博士研究生,1970年2月生;经亚枝,女,副教授,1942年4月生;张焕春,男,教授,博士生导师,1940年3月生。

式中的负号由测量电路中的反相器引入。由式(2)可得

$$C_x = - \frac{1}{\omega R_s} \times \frac{N_1 N_4 - N_2 N_3}{N_1^2 + N_2^2}$$

$$G_x = - \frac{1}{R_s} \times \frac{N_1 N_3 + N_2 N_4}{N_1^2 + N_2^2}$$

$$D_x = \frac{G_x}{\omega C_x} = \frac{1}{R_s} \times \frac{N_1 N_3 + N_2 N_4}{N_1 N_4 - N_2 N_3}$$

依此类推,可求出其他被测参数的数学模型。详情请参阅文[1]。

## 2 系统设计

### 2.1 正弦激励信号源

RLC 数字电桥需要一个正弦激励信号源,为了保证测试精度,要求信号源产生的正弦信号波形失真小,幅值稳定。DDS 方法因其固有的优点,精

确的分辨率和内在的稳定性,频率、相位精确可调,已在自动测试系统和智能仪器中得到了广泛的应用。本课题采用了 ALTERA 公司的 FLEX 10K 系列的 CPLD 芯片 EPF 10K10A 设计 DDS 信号发生器,具体设计功能框图如图 3 所示。

7.68 MHz 的时钟信号送到 CPLD EPF 10K10A,经分频网络,得到依次 2 倍关系的 8 路频率信号,让这 8 路信号去寻址 ROM,ROM 内存放了 256 个按正弦规律存放的数据,这样 ROM 输出了 8 路按正弦规律变化的频率信号,经 D/A 转换器,就得到了阶梯正弦波,然后经滤波和功率放大,就获得了测试信号。信号频率由单片机的 P<sub>1.0</sub> 和 P<sub>1.1</sub> 控制:若 P<sub>1.0</sub>=0, P<sub>1.1</sub>=0,则合成信号频率 f=100 Hz;若 P<sub>1.0</sub>=1, P<sub>1.1</sub>=0,则合成信号频率 f=1 kHz;若 P<sub>1.0</sub>=0, P<sub>1.1</sub>=1,则合成信号频率 f=10 kHz。

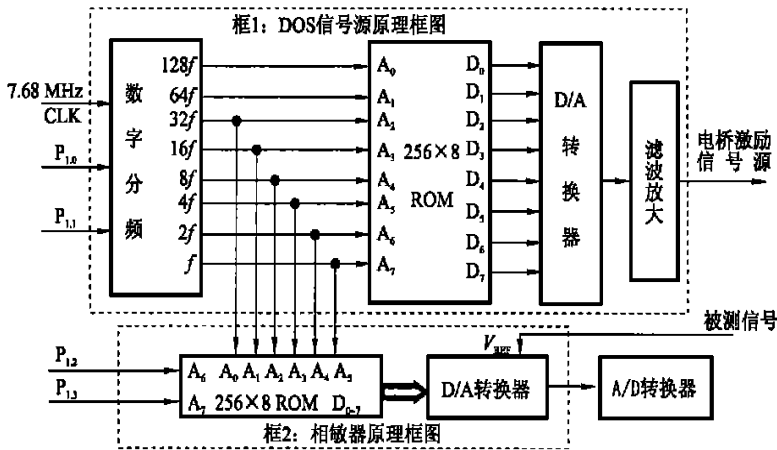


图 3 DDS 信号源及相敏检波器原理框图

### 2.2 相敏检波器

在 RLC 数字电桥设计中,通常采用半波鉴相法<sup>[2]</sup>。因为采用分立器件,鉴相效果较差,所以本文采用乘法型 D/A 转换器,实现了数字鉴相。原理如图 3 中的框 2 所示:其中,ROM 内放置了 4 组数据,每组由 64 个数据组成,分别代表了 4 组彼此相差 90 的正弦波。通过 51 系列单片机的 P<sub>1.2</sub>, P<sub>1.3</sub> 端口选择不同的数据区。用 6 路信号寻址 ROM,ROM 输出的 8 路数字式基准相位信号送到 8 位乘法型 D/A 转换器 AD 7524,被测信号加到参考电压 V<sub>REF</sub> 端。这样,在 D/A 转换器内部,通过基准相位信号和被测信号相乘,实现了数字全波鉴相。这种方法较半波鉴相更为精确,因为:基准相位信号的初相位可以精确确定(只要 ROM 内的波形数

据值正确),同时 D/A 转换器较模拟开关减少了输出尖峰脉冲,温度系数小,增加了鉴相输出的稳定性。

### 2.3 A/D 转换器

在 RLC 数字电桥中,经常使用积分式的 A/D 转换器。积分式的 A/D 转换器能有效抑制串模干扰,测量精度高,但它也存在速度慢,零区跳字等弱点。积分器是积分式 ADC 原理的核心,它的性能优劣直接影响着整机的精度指标和分辨率。为了提高测量精度,对本积分器设计,作者参考文[3]、改进的双斜积分法<sup>[4]</sup>和三斜积分法<sup>[5]</sup>,集众家之长,设计出了自己的积分器,积分器的输出电压曲线如图 4 所示。从图 4 可知:在一个测量周期内,由多个积分/反积分过程构成;在最后一个积分/反积分过



程中,采用了三斜积分法。其测量原理如下:

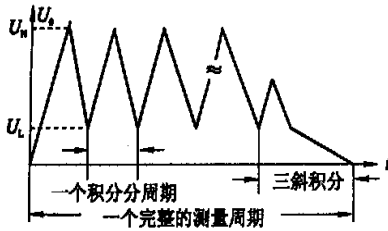


图4 积分器电压输出曲线

在一个完整的测量周期内,每一个积分/反积分过程称为一个分周期,每一个测量的分周期,可获得快速低分辨率的读数,通过累积低分辨率的读数,可以得到较高分辨率读数,关键在于:A/D在每一个分周期结束后不进行零操作,一次积分/反积分之后在积分电容器上剩余的电荷,将会对下一次积分/反积分的结果产生影响。经过多次累积,提高了分辨率。为具体说明此过程,图5绘出了积分器输出电压  $U_0$  的局部波形。 $U_b$  为反积分时,  $U_0$  在一个时钟周期内(相邻两记数脉冲间隔)的变化值,即积分器的最高分辨率。那么,如何提高分辨率,求出  $\Delta U_b$  的大小呢?

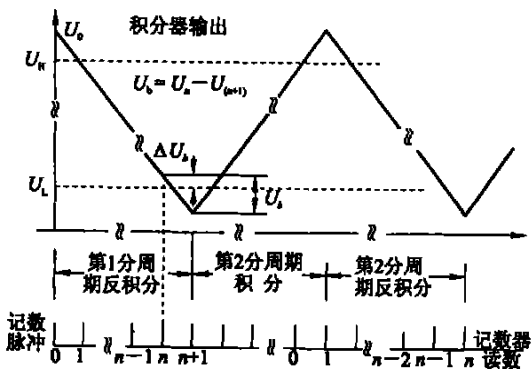


图5 剩余电荷的作用

当A/D反积分过比较器的低门限值  $U_L$  时,此时计数器的读数为  $n$ ,但反积分并不停止,而要等第  $n+1$  个计数脉冲到来,方才停止,这时计数器的读数为  $n+1$ ,且  $U_0$  已不等于  $U_L$ ,下周期的积分要从  $U_L - U_b + \Delta U_b$  这点开始;因为输入信号保持不变,第二分周期的峰值和第一分周期的峰值不再相等。这样,前一分周期结束时积分器上剩余的电荷,对下一分周期的读数就会产生影响。依此类推,当多个分周期的读数被累加起来后,即可将  $\Delta U_b$  “放大”到足以分辨的程度。

本A/D转换器,用两个比较器实现了多个双斜积分的切换。比较器的高门限值  $U_H$  设为  $5V$ ,这样使积分电容上电压的变化减小,减轻了电容器介质吸收对积分结果的影响,使积分曲线的线性度得到很大改善,减少了积分器的非线性误差。比较器的低门限值为  $U_L$ ,  $U_L$  没有设在零电平,而是通过电阻分压,设定了一个零点几伏的数值。当积分器的反向积分电压到达  $U_L$  并向零点积分时,改换成大电阻,使积分缓慢过零。这样,既扩大了记数值,有利于小信号的测量,也对比较器的带宽降低了要求,减少了比较器因频带过宽而带来的转换噪声,从而提高了测频分辨率和测频精度。具体设计如图6所示。

具体工作过程如下:

开始积分前,首先通过 GAL16V8 把输入信号接地,电阻  $R_0$  接到积分器的输入端形成闭环,对积分器和比较器进行清零。然后,向计数器 8253 的  $T_2$  写入测量时间常数,开始测量。其中,8253 的计数器  $T_0$  用于对快速反向积分过程记数,  $T_1$  对慢速反向积分记数。两个比较器  $N_1$  和  $N_2$  实现了多个双斜积分过程的切换。  $N_4$  为积分器。具体工作时序如图7所示。

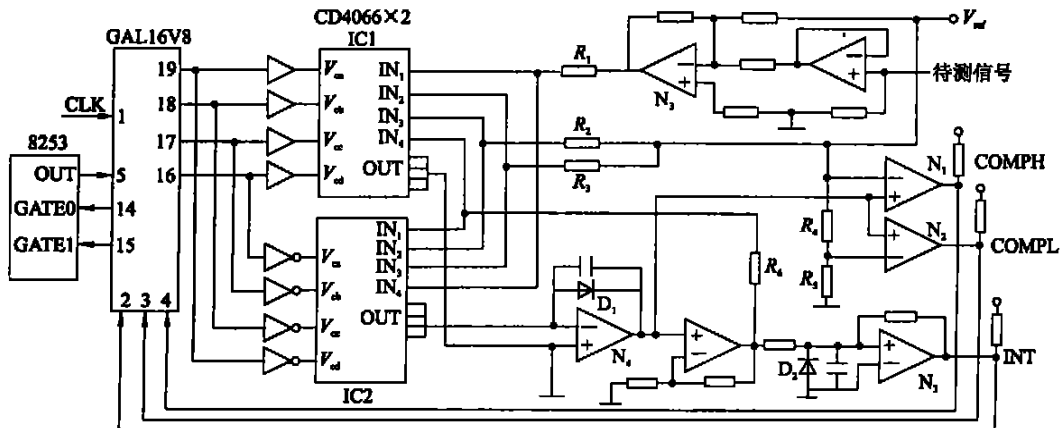


图6 A/D转换器的电原理图

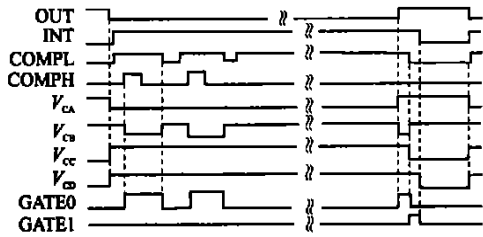


图 7 A/D 转换器的工作时序图

一个完整的测量过程包括 8 次测量, 前 4 次测量结果在正 X 轴和正 Y 轴上取得, 而后 4 次测量结果安排在坐标轴旋转 180° 后取得。图 7 为一次测量的工作时序图。图中, GATE 0 和 GATE 1 为 8253 的计数器 T<sub>0</sub> 和 T<sub>1</sub> 的门控信号, COMPL 和 COMPH 为两个比较器的输出端, INT 为积分器的输出端。V<sub>ca</sub>, V<sub>cb</sub>, V<sub>cc</sub>, V<sub>cd</sub> 为模拟开关 CD4066 的门控信号。

### 3 测量误差分析及校正

RLC 参数测量仪在测量中除含有随机误差外, 还有内部固定偏移、输入端的各种杂散参数以及测试信号源中谐波分量等因素所引起的系统误差, 分述如下:

**随机误差:** 随机误差可以通过多次测量取平均的方法予以削弱。

**谐波误差:** 本文只有三个测量频率, 所以采用了硬件滤波, 测试信号进入测试端时, 先通过滤波网络, 滤除谐波, 再送到测试端。

**固定的偏移的校正:** 固定偏移主要由有源器件零漂引起, 其结果等效于在待测交流信号上迭加了某一固定的直流电压。从这个角度上看, 本仪器在正向积分时迭加的偏置电压也是固定偏移的一部分, 固定偏移可以通过减法予以扣除。本仪器设定一次完整的测量共含 8 次测量。前 4 次测量结果在正 X 轴和正 Y 轴上取得, 而后 4 次测量结果安排在坐标轴旋转 180° 后取得。然后再把前 4 次测量结果于后 4 次测量结果相减。若通道的偏移量为 M, 则前 4 次测量值为 N + M, 后四次测量值 - N + M, 相减后得到 (N + M) - (-N + M) = 2N, 最后再将各分量值除以 2, 于是偏移量被消除。

**开路校正和短路校正:** 作者设计的 RLC 数字电桥, 采用五端测量<sup>[6]</sup> (五端测量法, 可以消除引线电阻、电感和接触的影响, 可对小阻抗进行准确的测量。它是在四端测量的基础上增加一保护端, 将

被测元件屏蔽以解决外壳悬浮影响的问题。如图 8 所示), 大大提高了测量小阻值元器件的能力。但仪器的测量端、测量馈线已及测量夹具总是存在残余阻抗和残余导纳, 给测量结果带来了误差。校正方法有公式修正和直接测量两种, 本文采用直接测量法: 分别将测试端短路和开路, 将测量结果存储起来, 用于修正测量结果, 简单可靠。

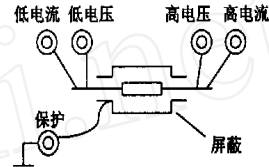


图 8 五端测量法

### 4 仪器测量范围及测试曲线

本仪器的测量范围如表 1 所示。仪器全范围的测量精度遵循图 9 的曲线, 此曲线均为清“0”后的测量状态。可以满足基本测试精度的阻抗范围(见图 9)。此曲线忽略了误差因子 (1 + D<sub>x</sub>) 或 (1 + 1/Q) 的影响, 实际进行精度计算时应同时考虑其影响。

表 1 仪器的测量范围

参数	频率	测量范围
L	100 Hz	1 μH ~ 9999 H
	1 kHz	0.1 μH ~ 999.9 H
	10 kHz	0.01 μH ~ 99.99 H
C	100 Hz	1 pF ~ 19999 μF
	1 kHz	0.1 pF ~ 1999.9 μF
	10 kHz	0.01 pF ~ 19.99 μF
R		0.1 ~ 99.99 mΩ
Q		0.01 ~ 999
D		0.01% ~ 999%

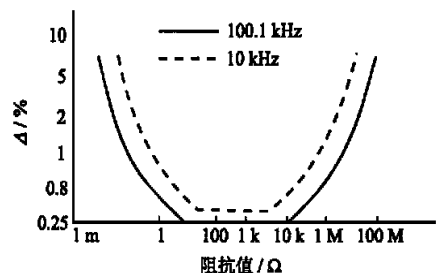


图 9 RLC 数字电桥的测量误差曲线

## 5 结束语

本RLC数字电桥由于采用了先进的测量原理和五端测量技术,设计方法独特,从软件和硬件上采取了一系列措施保证仪器测量精度,使本仪器基本测量精度达到了0.25%,可长期测量,无需专门调校。

### 参 考 文 献

1 陈 成 微机电子仪器的使用设计[M].北京:水利电力

出版社,1987.54 ~ 59

2 于振生 用双积分器对正弦电压模数变换[J].电子测量技术,1986,58 (6):26 ~ 29

3 富致超 积分式A/D变换器的积分误差及其与积分配置的关系[J].电测与仪表,1979,16 (2):1 ~ 7

4 洪良瑞 FLUKE“70”系列数字多用表的A/D交换器[J].电子测量技术,1992,82 (1):37 ~ 42

5 孟绍锋,詹红英 积分式A/D转换技术的发展过程[J].电子测量技术,1992,83 (2):46 ~ 50

6 刘 辉 电子仪器与测量技术[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1992.352 ~ 353

## A New Type RLC DigiBridge

*Li Nianqiang Liu Ya Jing Yazhi Zhang Huanchun*

College of Automation Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016, P.R. China

**Abstract** RLC digibridge is an intelligently computer-based instrument to measure parameters of elements automatically, including resistance  $R$ , inductor  $L$ , capacitance  $C$ , quality factor  $Q$ , and loss factor  $D$ , etc.. In this system, DDS (direct digital synthesis) is applied to produce good-wave and stable-amplitude sine wave as test signal. The free-axis measurement principle on  $V-I$  method and the five-terminal measurement technology are also employed. The phase-detector is specially designed to improve precision of measurement. The method is applied in integral-typed A/D converter to attain high converting precision.

**Key words:** direct digital frequency synthesis; digibridge; vector-free-axis method; digit-phased method