

一种小型阻抗分析仪的设计

作者 / 刘俊杰, 杨卫东, 李涛, 孙良, 电子科技大学物理电子学院; 罗秦欢, 贵州师范大学

DOI:10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2015.13.024

摘要: 本文基于V/I法设计了一种小型阻抗分析仪, 该系统使用同频正交的正弦信号作为参考源, 有效的解决了鉴相中的二值性判断问题、非线性问题。由STM32作为主控芯片, 可在测量范围内自动切换量程, 可在指定的频率点或频带内测量待测单口网络各参数, 并在TFT上绘制出频率特性曲线, 测量频率范围0~2MHz, 阻抗测量范围50~50KΩ, 相对误差小于5%, 相位差测量范围-90°~90°, 绝对误差小于2°。与当前市面常见的阻抗分析仪相比, 该阻抗分析仪具有操作便捷, 成本低廉的优点。

关键词: 阻抗; 正交; 鉴相

阻抗是描述网络和系统的重要参量之一, 对于单口网络, 阻抗定义为加在端口上的电压向量 \dot{U} 和流进端口的同频电流向量 \dot{I} 之比。阻抗分析仪在科研及实际生产中都有广泛的用途, 例如传感器测试、耳机测试、生物学研究等。通常使用的RLC表频率分辨率较低, 只能在单个或少数几个频率点上测量, 无法全面的反映出待测阻抗的频率特性, 现有阻抗分析仪虽然可以实现对阻抗在多频率点的精确测量, 但售价昂贵, 并不适用与个人或业余用途。因此需要针对要求不高的场合设计一种小型阻抗分析仪, 使其具有可以在指定频率测量一端口网络的阻抗模、阻抗角、电阻、电抗, 并在指定频带绘制出上述四个参量频率响应曲线的功能, 且具有一定的精度。在此需求下, 本文以V/I法测量阻抗进行系统设计。

1 系统结构

本简易网络阻抗分析仪主要由STM32主控模块、FPGA模块、I/V转换模块、真有效值-直流转换模块、鉴相模块组成。STM32主控模块实现对系统整体的控制, 并由其自带的12位A/D转换器实现对测量值的采集; FPGA模块与A/D转换单元、低通滤波单元联合构建双路正交正弦信号源, 产生幅度、频率、扫频范围可调的0~2MHz交流扫描信号; 显示及控制模块由带触屏控制功能的TFT实现, 在系统中实现对系统工作模式的设置、相应的测量值的实时显示等; 鉴相模块实现对电压与电流的相位差(阻抗角)的测量, 并以此计算电阻分量和电抗分量。系统结构框图如图1所示。

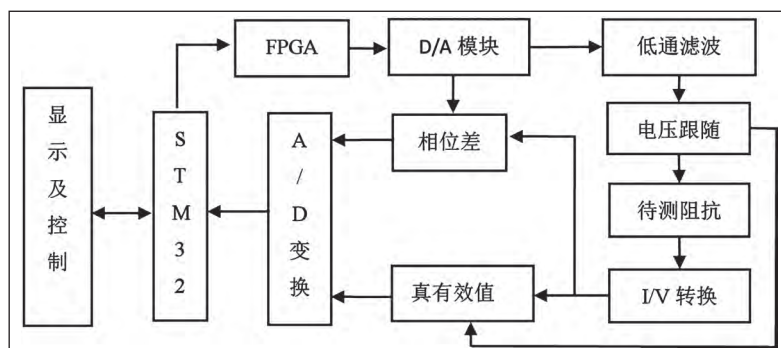


图1 总体系统框图

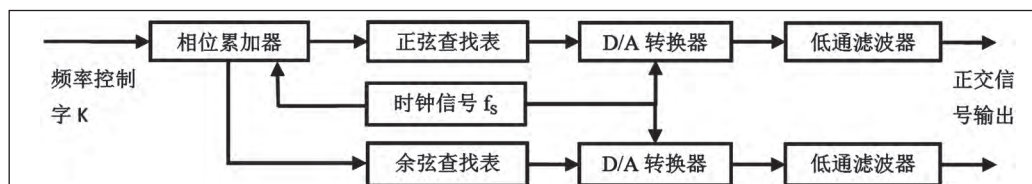


图3 信号发生器结构框图

2 方案分析计算

2.1 阻抗测量原理分析

本设计采用V/I法作为测量基础, 并使用跨阻放大器作为电流电压转换器。将被测阻抗两端的电压向量与被测阻抗的电流相量做向量除法, 便可得到被测阻抗的相量。原理示意图如图2所示:

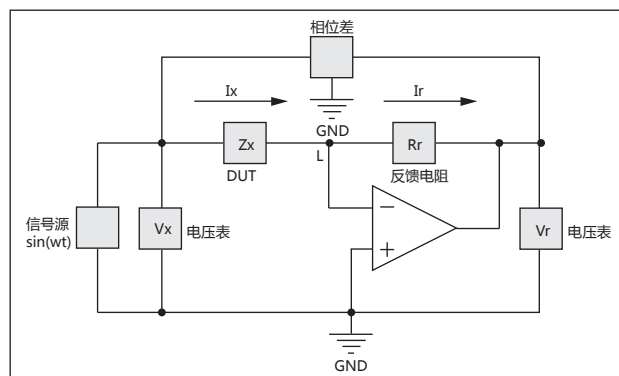


图2 V/I法原理示意图

从原理图可以看出, $I_x = I_r$, 从而可以得到:

$$\dot{Z}_x = \frac{\dot{V}_x}{\dot{I}_x} = \frac{\dot{V}_x}{\dot{I}_r} = R_r \frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_r} \left[\cos(\varphi_{V_x} - \varphi_{V_r} + \pi) + j \sin(\varphi_{V_x} - \varphi_{V_r} + \pi) \right] \quad (1)$$

将所求参数用已知量或检测量表达如下:

$$\begin{cases} \varphi_{Z_x} = \varphi_{V_x} - \varphi_{V_r} + \pi \\ |\dot{Z}_x| = R_r \left| \frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_r} \right| \\ \operatorname{Re}[\dot{Z}_x] = R_r \left| \frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_r} \right| \cos(\varphi_{Z_x}) \\ \operatorname{Im}[\dot{Z}_x] = R_r \left| \frac{\dot{V}_x}{\dot{V}_r} \right| \sin(\varphi_{Z_x}) \end{cases} \quad (2)$$

式中的 R_r 是反馈电阻, 起量程选择的作用, 是参数已知的元件。

其中 V_r 、 V_x 通过真有效值-直流转换模块转换为直流后测量, 相位差 φ_{Z_x} 可以通过鉴相模块直接测得。

2.2 正弦信号发生器方案原理分析

本文以FPGA开发平台为核心采用直接数字频率合成技术实现了一个频率可

控、输出同频正交信号的正弦信号发生器。其结构如图 3 所示。

在 EPROM 中存储一个正弦查询表、一个余弦查询表, 相位累加器在每一个时钟脉冲信号波沿到来时, 把频率控制字累加一次, 并用相位累加器输出的数据作为波形存储器 (ROM) 的相位读取地址^[1], 查表输出数据到 DAC 转换为接近正弦的阶梯状信号, 再经低通无源滤波器抑制高频分量, 输出波形较为平滑、频谱较为纯净的正弦波信号。

3 电路设计

■ 3.1 鉴相模块

鉴相模块将同频信号的相位差转换为 0~1.8V 输出电压，精确典型值小于 1° ，但也存在如二值性判断、非线性误差等一些问题，这里给出了我们的解决方案：

当只有一路同频参考信号时不能直观判断出待测信号与参考信号的相位差是在 $-180^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 还是在 $0^{\circ} \sim +180^{\circ}$ 之间,存在着相位差二值性判断问题^[2]。为判断相位差的正负,我们用同频正交的参考信号同时与待测信号进行比较,同时得到相位差的大小及符号,可以完全解决 AD8302 芯片用于相位差检测时存在的二值性判断问题。

相位差测量在靠近 0 或 180° 时都存在很大的非线性误差, 据数据手册可知, 当输入信号在 900MHz 时, AD8302 在其整个 180° 的测量范围内能使相位测量精度线性保持在 $\pm 1^\circ$ 以内的部分只有 143°, 而在 0° 或 180° 附近最大非线性误差超过 8° [12]。当采用正交参考信号时, 若待测信号和某一路参考信号的相位差落在接近 0 或 180° 非线性区, 则另一路信号一定会落在线性区, 这时仍然能得到一个有效的相位差信号, 通过软件判断可以选择有效的信

号作为输出,可见采用正交参考信号同时有效的解决了非线性问题。电路连接图如图4所示。

■ 3.2 电流电压变换模块

电流电压变换模块利用高速运放 TSH3001, 将不易直接测量的电流信号转换为易于直接测量的电压信号。通过继电器选择反馈电阻来实现自动切换量程, 电路原

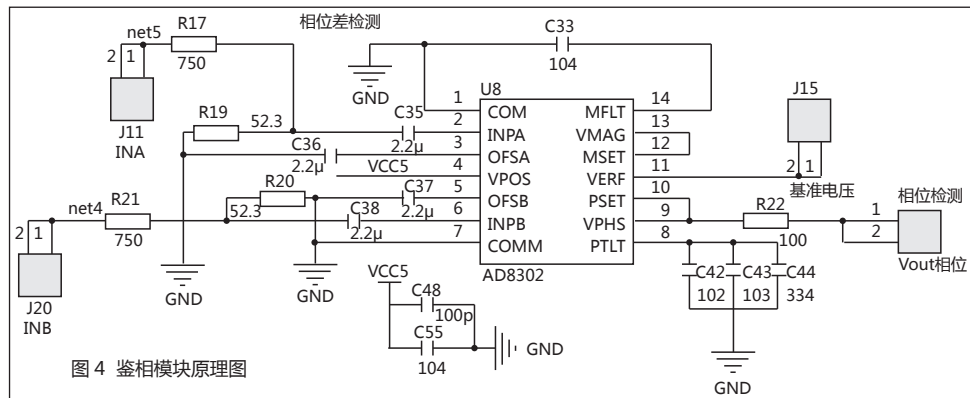


图 4 鉴相模块原理图

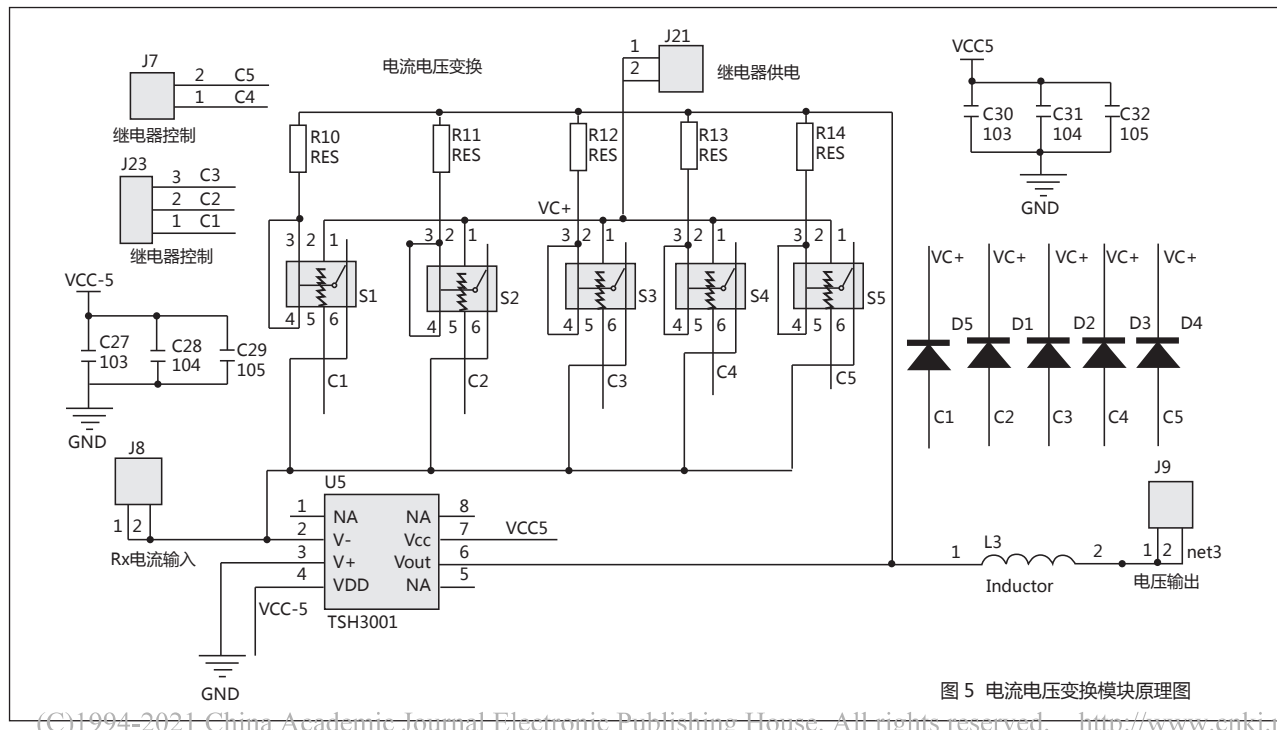


图 5 电流电压变换模块原理图

表 1 部分测试结果

标称值		测量值						
模(Ω)	阻抗角	阻抗模(Ω)	阻抗模相对误差	阻抗角	阻抗角绝对误差	电阻(Ω)	电抗(Ω)	频率(Hz)
360	0°	355.010	1.39%	0°	0°	355.010	0	100K
2.11K	-34.1°	2.032K	3.70%	-35.2°	-1.1°	1.660K	-1.171K	300K
9.04K	-90°	8.875K	1.83%	-88.6°	1.4°	216.836	-8.872K	150K
1.23K	-72°	1.198K	2.60%	-70.1°	1.9°	407.775	-1.126K	700K
641.14	-15.3°	627.0	2.21%	-14.1°	1.2°	608.110	-152.747	800K
23.63K	19.8°	23.206K	1.79%	21.5°	1.7°	21.642K	8.505K	1M
20.17K	12.5°	19.372K	3.96%	13.8°	1.3°	18.813K	4.621K	1.4M
326.69	-10.2°	320.0	2.05%	-9.6°	0.6°	315.519	-53.366	1.9M

4.2 结果分析

根据测试结果,可以得到测试结论为:该阻抗测量仪可实现的指标为信号源输出频率 0 ~ 2MHz 可调,步进 1Hz,幅值 0 ~ 5V 可调,两路输出信号相位差 90°,阻抗测量范围 50 ~ 50KΩ,相对误差小于 5%,相位差测量范围 -90° ~ 90°,绝对误差小于 2°。硬件实物如图 6 所示。

4.3 存在问题和改进方法

信号发生器本身存在相位截断误差、幅值量化误差、DAC 非线性误差引起的杂散^[3],导致输出信号的频谱中出现杂散谱线影响系统的测量,对此可以通过 ROM 表压缩、扰动技术、改进相位累加器结构等方法抑制杂散,本文限于篇幅,对此不再做出深入介绍。由于高频激励下元器件分布参数导致元件特性偏离标称值,使阻抗网络模型理论计算值不准确导致测量失误,可以通过用数字电桥实测值作为标准值,对测量结果加以修正来改善。另外在量程跳变时会存在一定的误差,因此在绘制频率特性曲线时会在量程切换点出现微小的跳变,但可以通过调节量程范围做出一定的改进。

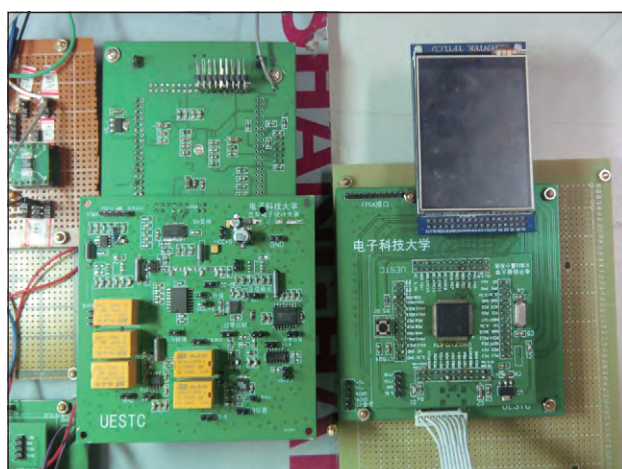


图 6 硬件实物图

理图如图 5 所示。

4 硬件测试

4.1 测试结果

根据标准元件标称值和连接方式由 matlab 计算出所测频率点的各待测参数及阻抗网络频率响应的图像,然后将测量值、计算值、示波器所测的信号三者情况进行比对。

部分测试结果如表 1 所示。

参考文献:

- * [1] 蓝天、张金林.直接数字频率合成器 DDS 的优化设计[J].电子技术应用,2007(5):219-221
- * [2] 李星、许国宏、王耀磊.高精度幅相检测系统的设计[J].电子设计工程,2012(1):123-125.
- * [3] 彭辉生.基于 DDS 的信号发生器的研究与实现[D].湖北:武汉理工大学,2007.
- * [4] 耿浩非.基于 STM32 的便携式双道生物阻抗测量系统的研制[D].重庆:重庆医科大学,2013.

上接 84 页

40 吨,因此 AD 采样每位值等效重量 t 为:

$$t = \frac{\text{满量程}}{(\text{满量程输出} * G / \text{AD 采样范围} * \text{采样精度})} = \frac{40000}{(10 * 491 / 5000 * 2^{16})} \approx 0.62 \text{Kg}$$

5 结论

通过对电源和信号的优化设计,称重传感器信号经过放大采样,以及软件滤波后,称量波动能有效控制在 1Kg 左右,满量程称量误差不超过 5Kg 的要求,成功应用于公司称台式动态汽车衡上。

参考文献:

- * [1]AD8421-EP: Enhanced Product Data Sheet
- * [2] 赛尔吉欧·弗朗哥.基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计.西安交通大学出版社
- * [3] 刘爱华、满宝元.传感器原理及应用.人民邮电出版社
- * [4] 张金.模拟信号调理技术.电子工业出版社
- * [5] 李希文.传感器与信号调理技术.西安电子科技大学出版社