

# 低频低阻抗精确测量系统

王雪军 顾金良 罗红娥 夏 言 栗保明

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室 南京 210094)

**摘 要:** 为了对电磁发射系统中枢轨接触界面的接触阻抗进行测量与研究,研制了在低频条件下针对低阻抗的测量系统。通过阻抗变换法分别测量待测阻抗和标准阻抗两端的矢量电压,并通过基于自由轴的相敏检波法将矢量电压的实部和虚部分离开,根据标准阻抗电压和待测阻抗电压的相互关系求解待测阻抗的大小。系统通过 STM32 控制器作为信号发生器和控制器,采用开尔文四线法减小引线电阻和接触电阻的影响,采用软件补偿方法减小测量误差。测量结果表明,测量系统在 10 kHz 以内可正常工作,并且在测量 100  $\Omega$  以内电阻具有较高精度。

**关键词:** 阻抗测量; pwm 合成; 相敏检波; STM32

**中图分类号:** TN707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 535.1030

## Low frequency and low impedance precision measurement system

Wang Xuejun Gu Jinliang Luo Hong'e Xia Yan Li Baoming

(National Key Laboratory of transient physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to measure and study the contact impedance of the contact interface between the central rail and the electromagnetic launching system, a low impedance measurement system at low frequency is developed. The system measures the vector voltage at both ends of the impedance to be measured and the standard impedance separately by impedance transformation method. The real and imaginary parts of the vector voltage are separated by phase sensitive detection method based on free axis. The magnitude of the impedance to be measured is calculated according to the relationship between the standard impedance voltage and the impedance voltage to be measured. The system uses STM32 controller as signal generator and controller, adopts Kelvin four-wire method to reduce the influence of lead resistance and contact resistance, and uses software compensation method to reduce measurement error. The measurement results show that the measuring system can work normally within 10 kHz and has high accuracy in measuring resistance within 100  $\Omega$ .

**Keywords:** impedance measurement; PWM synthesis; phase sensitive detection; STM32

## 0 引 言

目前电磁发射系统的枢轨接触界面的接触阻抗对界面热量和电磁轨道炮的性能有着重要影响,目前关于电磁轨道炮接触阻抗的研究主要通过数值计算或者建立发射电路模型,确定回路阻抗表达式来确定接触电阻<sup>[1]</sup>,无法确定接触电容与接触面状态之间的关系,而接触表面若存在污染、腐蚀、氧化或熔融等情况,接触电容将会成为主要的影响参数,通过仿真的方法无法准确模拟接触面间的摩擦相变和电容量之间的关系,因此需要精确测定接触电阻、接触电容、接触电感和品质因数等参数,全面评价接触面状态,为电磁轨道炮的设计优化提供参考。研制的阻抗测量系统主要针对于电磁轨道炮接触阻抗波幅大并且阻抗值较小的情况开发了该阻抗测量系统。任庆芳等<sup>[2]</sup>利用双定向耦合器

和幅相检测芯片 AD8302 设计了一款简易阻抗测量仪,实现了在较高频率范围内阻抗的初步测量。张亚辉等设计了基于 ARM 的阻抗测量系统,测量精度高成本低,但是未采用有效方法消除引线电阻和接触电阻的影响。ADI 公司在 2005 年发布了阻抗测量测试芯片 AD5933,是利用 DFT 将时域采集的数据转换到频域进行分析,从而实现测量,但是 AD5933 存在测量上限低(100 kHz)、低频范围(0~5 kHz)测量误差较大等问题<sup>[3]</sup>。目前市面上主要使用安捷伦公司生产的型号 4294A 精密阻抗分析仪器,该仪器测量频率范围宽,误差小,但是造价昂贵且体积大,不适合实战场外测量。本测量系统基于阻抗变换法获得被测阻抗和标准阻抗的矢量电压信息,然后基于自由轴的相敏检波法分离矢量电压的实部和虚部,通过电压在坐标轴上投影值的关系计

算得到待测阻抗值。

## 1 测量原理

目前对于接触阻抗的测量方法包括开尔文双臂电桥法、谐振法和阻抗变换法。开尔文双臂电桥法的测量精度较高,但是测量过程中需要手动调节桥臂平衡,难以实现自动测量。谐振法需要调节信号源频率,使得电路发生谐振,测量精度低并且测量速度慢。因此采取阻抗变换法,即伏安法,基于最基本的电路原理——欧姆定律<sup>[4]</sup>。阻抗变换法将被测阻抗转换成相应的电压,先取一个电流值大小已知的正弦交流电流  $I_0$ , 分别流经待测阻抗  $Z_{\text{DUTm}}$  和标准阻抗  $Z_L$ , 测出两端电压  $U_{\text{DUTm}}$  和  $U_L$ , 通过式(1)中二者的串联关系可计算得到待测阻抗。

$$Z_{\text{DUTm}} = \frac{U_{\text{DUTm}}}{U_L} \times Z_L = \frac{U_1 + jU_2}{U_3 + jU_4} \times Z_L = \frac{eN_1 + jeU_2}{eN_3 + jeU_4} \times Z_L \quad (1)$$

式中:  $U_i$  分别为待测矢量电压在  $x$  和  $y$  轴的投影,  $N_i$  为  $U_i$  AD 转换后对应的数字量,  $e$  为刻度系数。对于式(1)中, 将矢量电压  $U_{\text{DUTm}}$  和  $U_L$  的实部和虚部分离开的方法为基于自由轴的相敏检波法。自由轴法如图1所示, 给定2个相位相差  $90^\circ$  的参考信号驱动相敏检波器, 输出即为  $U_i$ , 再经过 AD 转换可得到对应的数字量  $N_i$ 。

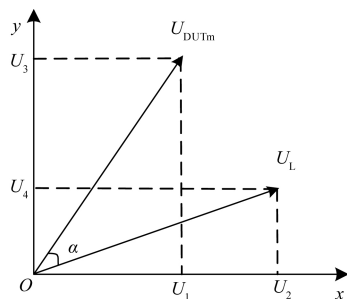


图1 自由轴法矢量图

在实际测量阻抗时,需要对元件的电抗模型进行等效,例如低阻抗元件采用串联方式,高阻抗元件采用并联方式,阻抗高低的判别值取  $1 \text{ k}\Omega$ 。电阻的串并联模型如式(2)和(3)所示,其他参数的计算模型请参阅文献<sup>[5]</sup>。

电阻并联:

$$R_P = -R_S \times \frac{N_1^2 + N_2^2}{N_1 N_3 + N_2 N_4} \quad (2)$$

电阻串联:

$$R_S = -R_S \times \frac{N_1 N_3 + N_2 N_4}{N_3^2 + N_4^2} \quad (3)$$

## 2 系统设计

设计的阻抗测量系统由主控芯片 STM32f103 作为控制芯片和正弦信号以及正交信号的发生器,测试部分包括前端矢量电压测量电路、二级增益可控放大电路、相敏检波

及 AD 转换电路,电路原理如图2所示。

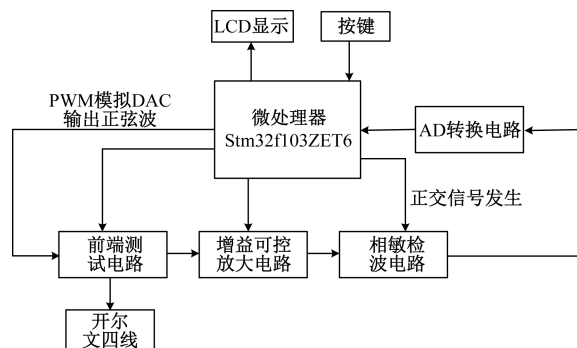


图2 系统原理

### 2.1 前端测量及放大电路

前端测量电路中待测电阻的接入采用四端开尔文测量法,由于引线电阻和探针与试件的接触电阻值在欧姆量级,当被测电阻值小于几欧姆的时候,传统的两线测试方法会增大测试误差<sup>[6]</sup>,可通过开尔文连接方式进行测试<sup>[7]</sup>。原理如图3所示,开尔文连接需要激励线和检测线构成2个独立回路,检测回路的输入阻抗大,流入的电流小<sup>[8]</sup>,图3中  $r$  表示引线电阻和探针与测试点的接触电阻之和,由于流过测试回路的电流极小,在  $r_1$  和  $r_4$  上的压降极小,而激励电流在  $r_2$  和  $r_3$  上的压降不影响电流在被测电阻的压降,所以后面测试电路可以准确测出  $R_t$  两端的电压值<sup>[9]</sup>。

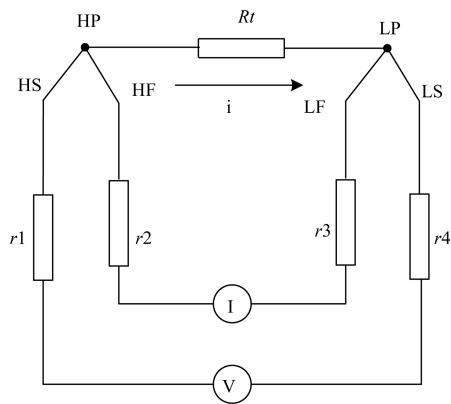


图3 开尔文四线测量原理

测试电路采用可以抑制共模误差的“仪表三运放”电路分别对待测阻抗和标准阻抗进行缓冲放大,放大倍数设计为5倍<sup>[10]</sup>。增益可控的放大电路采用 TL082 芯片进行级联,电路通过 STM32GPIO 口输出高低电平控制电子开关 CD4053 进行量程切换和放大倍数切换,放大倍数可以选择为1、10或100倍。

### 2.2 相敏检波及 AD 转换电路

常见的相敏检波器分为模拟乘法器式和电子开关式,由于模拟乘法器是相敏检波器需要保证参考信号的幅度稳定并且存在非线性等问题,因此选用电子开关式相敏检波

器,并且结合双积分 AD 转换器同时完成了相敏检波和 AD 转换过程。工作过程如图 4 所示,S1 由基准相位信号控制,在 S1 导通时,正比于各待测电压的投影分量  $U_i$  和直流偏置信号加到积分器,积分器对 S1 导通的信号进行积分,使积分器输出负向斜变,输出电压达到一定负值。而后 S1 关断 S2 闭合,基准电压  $U_r$  经由电阻进入积分器,开始反向定值积分,同时启动计数器计数,当比较器检测到输出为 0 时,结束积分同时闭合 S3 使积分电容短路,计数器中的数值  $N_i$  正比于待测电压值<sup>[11]</sup>。

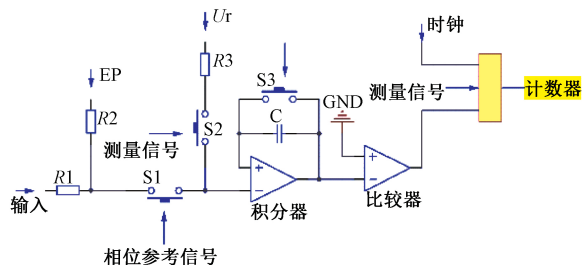


图 4 相敏检波及 AD 转换原理

基于以上原理设计基于模拟开关 CD4053 的相敏检波器电路如图 5 所示,该电路包括隔直输入、开关鉴相和低通输出 3 个部分。输入信号通过隔直电容输入通道 Y,通道 X 接与输入信号同频率的  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方波信号,切换选择方波信号即为切换选择输出  $x$  轴或  $y$  轴上的投影电压量。在模拟输出端加入电压跟随器以及低通滤波器可以增加输入阻抗,减小输出电流对 AD 电路的影响,提取鉴相后的直流分量,得到输入正弦信号的相位。

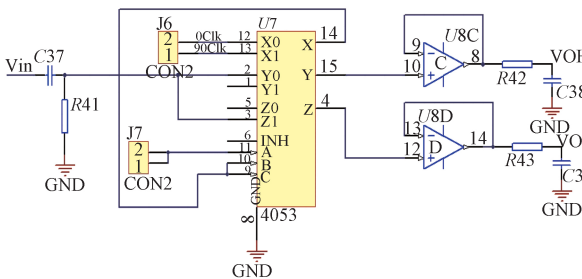


图 5 相敏检波电路

积分电路选用四位半的双积分 A/D 转换器 ICL7135,它相当于 14 bit 的 A/D 转换器,转换精度高、抗干扰能力强、性价比高。其转换时序如图 6 所示,转换部分包括自校准(调 0),正向积分(被测模拟电压积分),反向积分(基准电压积分)和过零检测 4 个部分,其中自校准时间为 10 001 个脉冲,然后 BUSY 端变为高电平,开始正向积分,正向积分时间为 10 000 个脉冲,正向积分结束后,反向积分  $X$  个脉冲直至电压到 0 为止。故从正向积分开始计数脉冲个数,到反向积分为 0 时停止计数。将计数的脉冲个数减正向积分的 10 000 个脉冲,即得到对应的模拟量<sup>[12]</sup>。

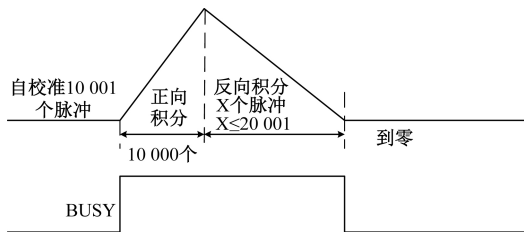


图 6 ICL7135 时序转换

## 2.3 系统软件设计

设计的阻抗测试仪的流程为:上电初始化,使 PA.4 口持续输出幅值为 200 mV 频率为 1 kHz 的正弦波,PA.6 和 PA.7 输出相位相差  $90^\circ$  的方波,初始化后设置扫描参数,执行扫描命令控制测量电路进行数据采集,采集完后极性数据处理,最后显示结果及保存。主程序测试流程如图 7 所示。

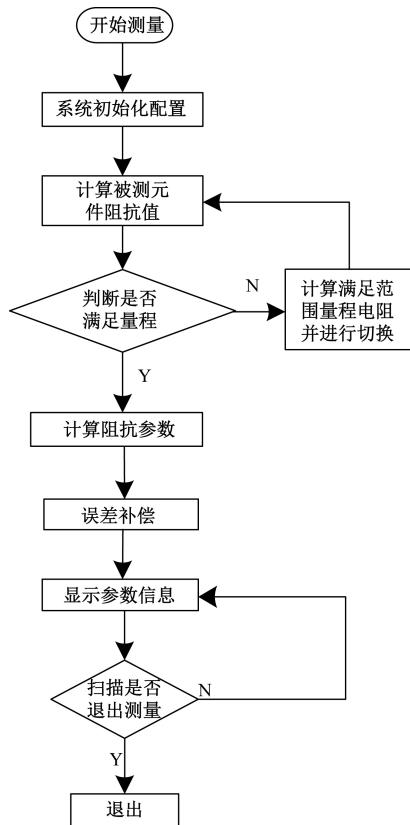


图 7 软件流程

信号发生电路需要产生一个精准的正弦信号为测试电路提供激励信号,并且产生 2 个同频并移相  $90^\circ$  的方波信号作为相敏检波电路的参考信号,信号发生电路利用 STM32 芯片的 PWM 输出功能,结合低通滤波电路,通过软件模拟 DDS 合成的方式产生正弦信号。

首先在单片机 ROM 中写好正弦函数查询表,设计采样频率为 16 kHz,正弦波频率为 1 kHz,在样本表中每隔

8 个点取出一一点作为 PWM 输出,根据正弦波取值表中的数据产生不同占空比的 PWM 信号,由于输出信号高次谐波比较严重,因此在输出端加上多级低通滤波电路<sup>[13]</sup>。输出频率 1 kHz,幅值 200 mV 的正弦波,方波通过 STM32 通用定时器的 Toggle 模式,在每个 ARR 周期内,CNT 计数到 CCR 对应的值即出发对应通道的电平翻转,设定不同的 CCR 值,电平的翻转时间不同,即可产生相位移动。

3 结果与误差分析

如前所述方法的测量结果中存在多种系统误差,分别通过不同的方法予以消除。

首先是随机误差和标准电阻的精度误差,可以通过选取温度系数小、精度为 0.1% 的电阻,并通过中值滤波和多次测量求平均值来消除<sup>[14]</sup>

器件夹具误差,具体方法为将模拟开关切换至初始量程后,按照初始设定频率参数进行扫描,共测量 10 组数据,将 10 组测量得到的数据按照冒泡法进行排序,取中间 4 个数据的平均值计算阻抗值,判断是否满足在标准阻抗的 1/30~30 倍之间,若是,则为合适量程,输出阻抗值;若否,切换量程重复上述步骤<sup>[13]</sup>。

其次由于测量时会进行多量程切换,因此要通过开路/短路/负载补偿这种适用于复杂残余电路的先进补偿技术,开路补偿寄生导纳,短路补偿寄生阻抗,负载补偿通过基准电阻补偿。

首先要建立测试夹具残余阻抗模型的 4 端网络电路,如图 8 所示<sup>[15]</sup>。

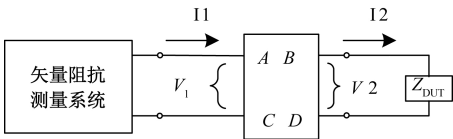


图 8 附加残余阻抗网络模型

通过短路、开路和标准负载( $Z_L$ )的测量值(分别为  $Z_s$ 、 $Z_o$ 、 $Z_{Lm}$ )对系统进行校准,根据文献[4]计算出的阻抗测量值  $Z_{DUTm}$  与实际被测阻抗的关系如下:

$$\begin{aligned} Z_{DUTm} &= \frac{AV_2 + BI_2}{CV_2 + DI_2} = \frac{AZ_{DUT} + B}{CZ_{DUT} + D} = \\ &= \frac{Z_{DUT} + B/A}{Z_{DUT}(C/A) + D/A} \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{cases} Z_s = \frac{B/A}{D/A} \\ Z_o = \frac{1}{C/A} \\ Z_{Lm} = \frac{Z_L + B/A}{Z_L(C/A) + D/A} \end{cases} \tag{5}$$

则用于补偿测量的参数为:

$$\begin{cases} C/A = \frac{1}{Z_o} \\ D/A = \frac{Z_L(1 - Z_{Lm}/Z_o)}{Z_{Lm} - Z_s} \\ B/A = \frac{Z_s Z_L(1 - Z_{Lm}/Z_o)}{Z_{Lm} - Z_s} \end{cases} \tag{6}$$

对式中  $Z_{DUTm}$  进行修正后,得到实际  $Z_{DUT}$  的补偿计算如式 7 所示。

$$Z_{DUT} = \frac{Z_L(Z_s - Z_{DUTm})(Z_o - Z_{Lm})}{(Z_{Lm} - Z_s)(Z_{DUTm} - Z_o)} \tag{7}$$

将校准得到的参数和标准阻抗值保存在 STM32 存储器中,在实际测量时对结果进行修正。

测量数据通过 TFTLCD 显示屏进行显示,图 9 所示为单次测量结果。测量中选用高精密低温漂,误差在 0.1% 的标准电阻、1.0% 的电容进行测量,表 1、2 为 1 kHz 下测试数据。实验表明,研制的阻抗测量系统,在 1 kHz 条件下,对阻抗测量的精度保持在 1%±0.1% 以内。相比于目前同类型研究,该系统在低频段测试精度满足工业需求,可长期测量并且电路简单,成本低。

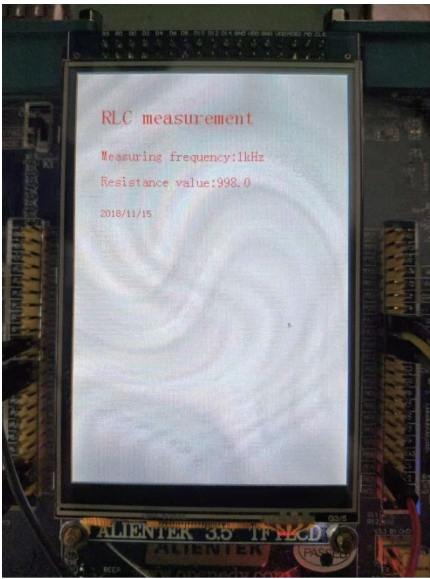


图 9 单次测量结果

表 1 电阻数据及误差

电阻/ $\Omega$	1 kHz 测量值/ $\Omega$	1 kHz 测量误差/%
1 000	998.027	-0.20
510	512.503	0.48
360	358.806	-0.33
100	99.417	-0.99
10	9.962	-0.10
1	1.010	0.1
0.25	0.248	-0.8

表 2 电容数据及误差

电容/nF	1 kHz 测量值/nF	1 kHz 测量误差/%
1.0	1.002	0.20
2.2	2.221	0.95
10	10.057	0.57
39	38.868	0.34
100	99.759	-0.10
330	330.355	0.11
560	560.294	0.05

4 结 论

该研究设计的 RLC 阻抗测量系统应用 STM32 作为信号源和控制器,简化硬件电路的设计,缩小仪器体积。并通过四线法消除引线电阻和接触阻抗的影响,通过软件方法补偿校正测量误差,验证了阻抗变换法测量 RLC 阻抗参数的测量精度在允许范围内,可用于电磁轨道炮内弹道的接触阻抗测试。从测量结果分析,随着测量电阻的逐渐减小,测量误差逐渐增大,这与文献[17]的分析结果一致,为了减小误差,采取中值滤波和开路/短路/负载修正方法。在高频情况该系统测量的误差较大,原因是信号来源是通过 STM32 的 PWM 输出功能实现,谐波干扰较多,并且硬件电路中运放和电阻等元件的高频性能较差,可通过 DDS 芯片产生正弦激励信号,以获得更好的高频特性。

参考文献

[1] 李鹤,雷彬,李治源,等.电磁轨道炮试验过程中枢轨界面的接触电阻特性[J].高电压技术,2013,39(4):911-915.

[2] 任庆芳,宋智,薛严冰.基于 AD8302 的简易阻抗测量仪[J].电子测量技术,2016,39(2):106-110.

[3] 温新华,颜小飞,安东.基于 AD5933 的便携式阻抗仪研制[J].计算机测量与控制,2013,21(4):1090-1092,1108.

[4] 黄利君,何蓉.基于数字鉴相的自由轴法 RLC 测量[J].

现代电子技术,2009,32(15):112-114.

[5] 赵茂泰.智能仪器原理及应用[M].北京:电子工业出版社,2004.

[6] 戴炜哲.测试系统的继电器电阻值异常的工程学分析及解决[D].上海:上海交通大学,2007:25-28.

[7] BAI J C,WANG Y T,GUO Z J,et al. Via hole contact resistance in TFT-LCD[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays,2015,30(3):432-436.

[8] 何亦山,邱天国.四线式测试技术研究[C].上海:2009 春季国际 PCB 技术/信息论坛,2009.

[9] 崔大海.多通道接触电阻无线测控仪的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007:33-35.

[10] 刘营涛.双臂机器人控制器设计及故障检测[D].西安:长安大学,2013:52-55.

[11] 宋悦孝.电子测量与仪器[M].北京:电子工业出版社,2009.

[12] 何宏,张金洲,张志宏.基于 GPIB 接口数据采集系统的设计[J].天津理工大学学报,2014,30(1):30-33.

[13] 刘希龙.低频高精度 LCR 测量仪的设计[D].吉林:吉林大学,2017:15-17.

[14] 卢玲,邵吟.一种矢量阻抗测量电路的原理与设计[J].杭州电子科技大学学报,2012,32(5):250-253.

[15] 彭庆畅,刘宇红.基于 DSP 的阻抗测量系统的研究[J].电子测量技术,2015,38(8):17-20.

[16] 李念强,刘亚,经亚枝,等.一种新型 RLC 数字电桥的研究[J].南京航空航天大学学报,2001,33(5):490-494.

作者简介

王雪军,硕士研究生,主要研究方向为测试计量技术、仪器仪表测试。  
E-mail:xuejun.wang@njust.edu.cn

顾金良,研究员,硕士生导师,主要研究方向为瞬态物理量的测量技术、智能测量与信号处理技术、智能检测系统及信号处理技术、精确制导弹箭的飞行控制技术。