

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.06.011

一种磁耦合谐振线圈结构阻抗测量装置设计

孔毅鹏,黄晓生,林抒毅,李楠

(福建工程学院 信息科学与工程学院,福建 福州 350118)

摘要:提出了一种基于矢量伏安法测量原理的便携式阻抗测量装置,并分析了磁耦合谐振式无线电能传输中耦合线圈结构阻抗测量电路的设计原理,通过单片机系统控制 AD5933 阻抗转换器测量待测谐振耦合结构的阻抗,利用串口通讯协议实现 LabVIEW 软件和单片机系统的相互通讯。实验结果表明,耦合线圈工作在谐振态下,阻抗测量值与理论阻抗值相对误差为 2%,成本较低,便于携带,能够满足大部分耦合线圈设计需求。

关键词:单片机;LabVIEW;阻抗测量

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)06-0566-06

Design of an impedance measurement device for magnetic coupling resonance coils

KONG Yipeng, HUANG Xiaosheng, LIN Shuyi, LI Nan

(School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A portable impedance measuring device based on the measuring principle of vector voltammetry was proposed. The design principle of the impedance measurement circuit of the coupling coil structure in magnetically-coupled resonant wireless power transmission was analyzed. The impedance of the resonant coupling structure was measured by AD5933 impedance converter controlled by single chip microcomputer, and the mutual communication between LabVIEW software and single-chip microcomputer system was realized by serial communication protocol. Experimental results show that when the coupling coil works in the resonant state, the relative error between the impedance measurement value and the theoretical impedance value is 2%, which can meet the design requirements of most coupling coils as it is cheaper and easy to carry.

Keywords: single chip microcomputer(SCM);LabVIEW;impedance measurement

随着科学技术发展,在交通运输,医疗电子,水下作业等各种应用场景,无线电能传输技术(Wireless Power Transfer, WPT)得到了广泛应用,其中,中短距离无线电能传输方式中耦合谐振无线电能传输方式是近年来研究热门^[1-5]。对于磁耦合谐振式 WPT 系统,磁耦合结构的设计优良关系到系统的传输功率和传输效率,因此磁耦合结构的设计是磁耦合谐振式 WPT 研究的关键技

术之一。磁耦合结构的基础模型包括发射线圈和接收线圈,在实验制作过程中,除了通过仿真模型获取发射线圈、接收线圈的阻抗,耦合因数,品质因数等,还需要通过高精密仪器对耦合线圈即发射和接受线圈进行实际测量,从而在测量中获取准确的设计参数,保证实验的准确性。目前,市场上一些比较知名的国外阻抗测量仪器生产公司,如美国的安捷伦,日本日置等;国内有常州的同

收稿日期: 2018-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607039);福建省教育厅科技项目(JAT170371);福建工程学院科研发展基金(GY-Z160122)

第一作者简介: 孔毅鹏(1992-),男,安徽池州人,硕士研究生,研究方向:无线电能传输技术、功率变换器。

通信作者: 黄晓生(1986-),男,副教授,博士,研究方向:无线电能传输技术、高频电力电子技术。

惠, 台湾的固纬等, 虽然这些厂商能够提供高精度的测量设备, 但是对于国内一些资金不充足的实验室或者个体, 这些仪器价格昂贵, 所以无法进行推广普及。

一般阻抗测量的方法可分为: 电桥法、谐振法、矢量伏安法等。文献[6]提出了电桥法在测量中的不准确度, 对于耦合线圈, 由于耦合线圈本身的材质等因素, 在使用电桥法时不易实现快速测量; 文献[7]提出一种谐振法阻抗方法, 但是在测量过程中需引进调谐线圈, 增加了工作量, 且线圈调谐不易实现; 文献[8]综合分析了上述几种方法在测量时的优缺点, 指出矢量伏安法测量的频率范围 10 kHz~100 MHz, 同时也便于采集测量数据。

综上所述, 系统基于矢量伏安法的测量原理, 采用 AD5933 作为测量芯片, 选用自带 A/D 的单片机作为主控芯片, 利用单片机串口通信功能, 将测量得到的数据通过 LabVIEW 软件在 PC 端显示实时测量数据, 从而实现整个测量系统。

1 系统整体设计方案

本设计的阻抗测量方法采用矢量法, 矢量伏安法测量原理如图 1 所示, 交流信号源 A_c 产生交流电流通过被测阻抗, 反馈电阻 R_{ref} 接入运算放大器负接线端, 与 Z_x 构成回路。利用运算放大器对 A 点的虚地作用实现 I/V 转换, Z_x , V_0 , V_1 系如下:

$$Z_x = -\frac{V_0 R_{ref}}{V_1} \tag{1}$$

式中: Z_x 为待测电阻, V_0 是输入电压矢量, V_1 是输出电压矢量。

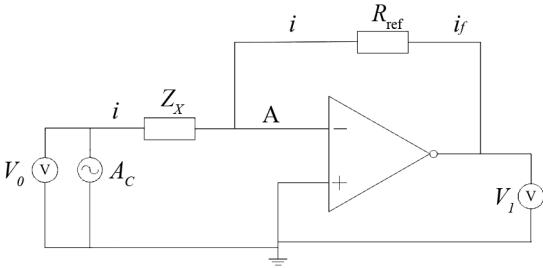


图 1 矢量伏安法测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of vector voltammetry

设输入电压矢量 $V_0 = U_0 e^{j\omega t}$, 输入电压矢量 $V_1 = U_1 e^{j\omega t + \theta}$, 则:

$$Z_x = -\frac{U_0}{U_1} e^{-j\theta} \tag{2}$$

式中 U_0 是输入电压值, U_1 是输出电压值, θ 是 V_0 , V_1 的相位差。因此, 通过测量输入电压与反馈电阻的输出电压的值, 两值之比与相位差即可计算出待测阻抗的阻抗值。

系统整体设计框图如图 2 所示, 单片机通过实时控制 AD5933 模块内部寄存器进行读写从而达到控制阻抗测量, AD5933 模块用频率发生器产生的信号激励外部复阻抗, 模块内部进行数据采集, 然后再通过离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transformation) 处理得到实部数据与虚部数据。根据实部数据与虚部数据可计算出待测器件的阻抗值与相位值。STC12 单片机通过与 LabVIEW 上位机系统进行串口通信便可实现数据实时互传。从而保证数据采集的有效性, 实时性。

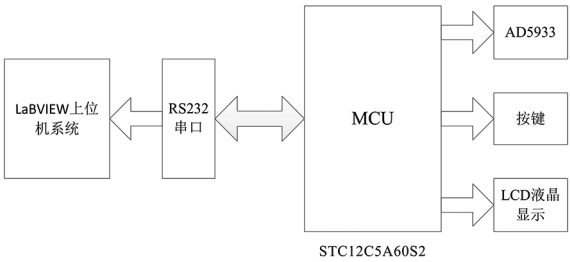


图 2 系统框图

Fig.2 Basic structure of the system

2 硬件电路设计

AD5933 通过芯片上的直接数字合成器 (Direct Digital Synthesizer, DDS) 可以产生 4 种不同幅度、直流偏置不同的正弦扫描信号去激励待测器件。AD5933 阻抗测量芯片内部框图如图 3 所示, 芯片使用外部时钟, 即 MCU 时钟为 AD5933 提供时钟频率。其所产生的正弦激励信号的其实频率、频率的增加量和增加的次数均可以通过软件进行设定。本次设计激励电压 0.2、0.4、1.0、2.0 V 4 个幅值。待测器件收到激励信号后产生一个响应信号, AD5933 通过接收器 (I/V 转换器, Programmable Gain Amplifier, Low Pass Filter, LPF) 接收响应信号并进行对反馈信号放大、滤波后经由 12 位 ADC 取样, 继而通过傅里叶变换 (Discrete Fourier Transformation, DFT), 由数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 做 DFT 运算, 产生一个实部数据字和一个虚部数据字, 最

终计算出待测阻抗值。此处根据获得的实部数据字和虚部数据字计算出的 DFT 的幅值 (Mag) 并非待测阻抗的实际阻抗值,需要经过增益因子的修正才能得到实际阻抗的值,计算 DFT 幅值的公式如式(3)所示:

$$\text{Mag} = \sqrt{R_m^2 + I_m^2} \tag{3}$$

式中 R_m 寄存器中的实部数据字, I_m 储存在寄存器中的虚部数据字。增益因子需要经过系统校准计算得出,在 VIN 端和 VOUT 端串联一个已知阻抗,结合已知的校正阻抗值和(3)式中计算的幅值可得出,计算增益系数的公式如下:

$$\text{增益系数} = 1/(\text{校正阻抗值} \times \text{幅值}) \tag{4}$$

在进行阻抗测量过程中,除了确定电阻的模值之外还需要确认相位角 φ 的大小,相位角计算公式如下:

$$\varphi = \arctan(I/R) \tag{5}$$

待测的阻抗实际相位角等于测量计算值减去标定的电阻的相位角值。

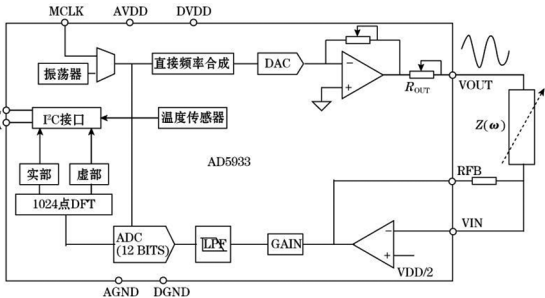


图 3 AD5933 阻抗测量芯片内部结构图

Fig.3 Internal structure of AD5933 impedance measurement chip

3 软件系统设计

3.1 下位机单片机程序系统设计

软件设计流程如图 4,测量阻抗前单片机系统先进行自测,自测结果通过 LCD1602 显示。若检测正常则进入下一步;若检测不正常通过按键进行复位。自测结束后进入测量,连接好待测阻抗,按下 K_2 按键进行一键测量,由 LCD1602 显示测量结果。

系统上电后下位机会自己自动进入自测流程,自测流程工作如下:默认设置激励频率 30 kHz,扫描步进 100 Hz,激励电压 2.0 V。当两测试头短接,测量为通路,显示“Self Testing OK”表示自测通过;显示自测“Self Test Error Please Re-

start!”,表示自测不通过,需将两测试头短接后按下复位键,显示自测通过。初始化成功时,时钟选择外部时钟 (MCU);增益预设 2 个档位:1 倍、5 倍 (默认 1 倍);激励电压预设 4 个档位:0.2、0.4、1、2.0 V (默认 2.0 V);频率增量预设 3 个档位:100、10、1 Hz (默认 100 Hz);起始频率预设 4 个档位:1、10、30、35 kHz (默认 30 kHz)。设置完成后操作 AD5933 进行测量,根据算法确认阻抗范围以此设置反馈电阻,执行完毕后进行相位判断,得出待测阻抗的实部数据字和虚部数据字。

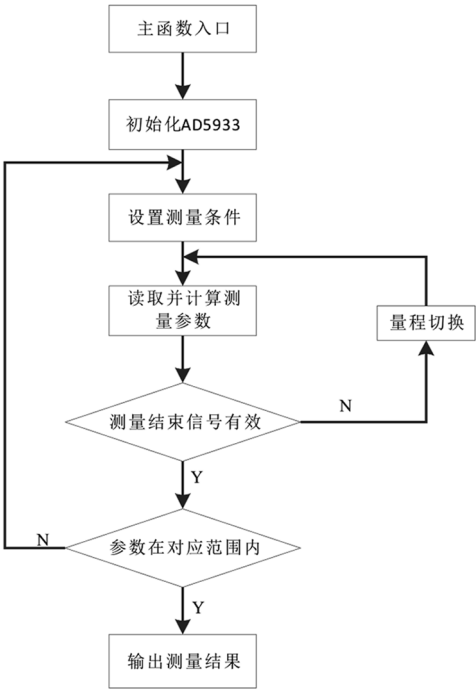


图 4 软件设计流程图

Fig.4 Flow chart of software design

3.2 LabVIEW 上位机程序系统设计

LabVIEW 是由美国国家仪器公司研制开发的一种虚拟仪器软件开发平台,他不同于传统的文本语言编辑,LabVIEW 使用的是图形化编辑语言编写程序,产生的程序是框图的形式,用于实现阻抗测量的实时显示。在 LabVIEW 环境中使用串口通讯协议^[6-12]与其他开发环境类似,其基本串口设置流程图如图 5 所示

为了实现与下位机通讯,首先要在 VISA 中完成串口参数的设置,包括串口资源分配,波特率,数据位,停止位,校验位等。系统上电初始化成功,串口开始通过 VISA Write 函数发送数据,接受数据则是通过 VISA Read 函数,VISA Bytesat

Serial Port 函数在接受数据之前会查询当前读取数据串口,从而使得 VI 子模块接受缓冲区中的数据字节数,如果缓冲区中的数据字节数小于所读取的字节数,VISA Read 函数的状态将一直保持等待,直至 Timeout 或者缓冲区中的数据字节数达到要求的字节数。当然也可以分批读取接收缓冲区或者只从中读取一定字节的数据。

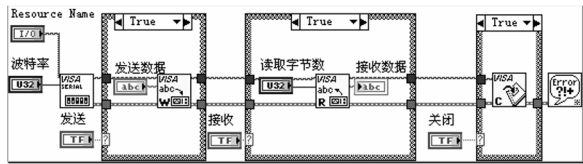


图 5 VI 串口设置界面
Fig.5 Setting interface of VI serial port

上位机 LabVIEW 运行的程序前面板正常工作如图 6 所示,本文中上位机 LabVIEW 采用扫频模式 VI 程序设计,包括串口参数设置,扫频参数设置(即频率和幅值),数据波形显示,数据存储等。若选定频率,实测得到阻抗幅值为 A ,相位为 B ,将得到的字符串放在 for 循环结构中,然后生成两个数组用于 XY 的坐标,得到数据后捆绑成簇,通过输出控件表现为波形型,反之,在相位波形只要将数据换成阻抗相位值。在初始化过后打开上位机开关、设置端口、设置起始频率(默认 30 kHz)、设置激励电压(默认 2.0 V)、设置测量点数(默认 10),点击“开始”进行测试。此时上下位机均会显示测量结果。

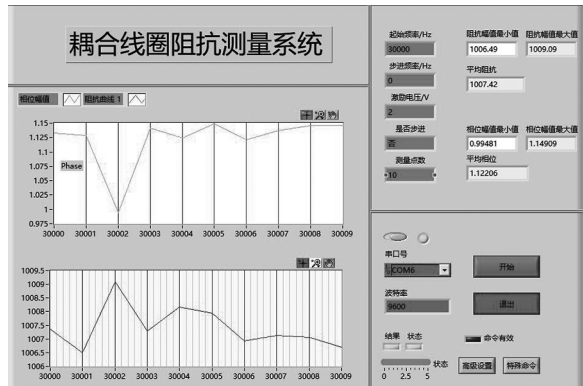


图 6 上位机测量界面
Fig.6 Measurement interface of the host computer

4 样机实验与数据分析

4.1 耦合线圈及模拟电路设计

目前磁耦合谐振式 WPT 系统的磁耦合结构

设计有多种类型,常见的如:圆形平面螺旋结构,矩形平面螺旋结构,空间螺旋形等,仿真模型如图 7 所示,通过仿真软件 ANSYS 图中仿真圆形平面螺旋结构,仿真图 7 所示,是线圈仿真的垂直截面图,外框是仿真时所必须设置的空气界面区域。

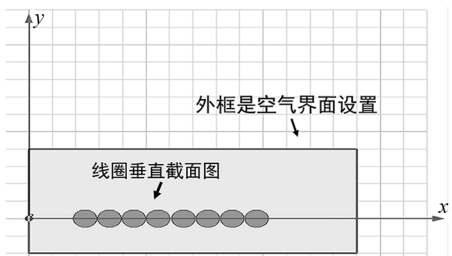


图 7 耦合线圈 2D 模型仿真图
Fig.7 2D simulation diagram of the coupling coil

在磁耦合谐振式 WPT 系统中,对于耦合线圈一般会建立仿真模型仿真获得耦合线圈参数,为了使磁耦合 WPT 系统中的发射线圈和接收线圈工作在谐振状态,在实际绕制完成以后,会进行线圈的调谐,本文采用 RLC 串联电路用于线圈调谐,该模拟电路结构简单,模型电路如图 8 所示。

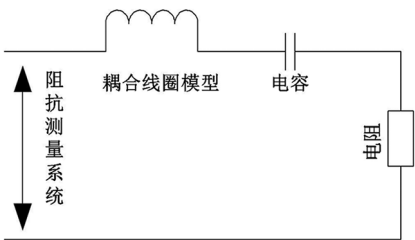


图 8 RLC 串联电路模型
Fig.8 RLC series circuit model

4.2 样机及实验数据测试

样机如图 9 所示,阻抗测量系统串联接入 RLC 电路中,上电后通过单片机系统通过串口通讯功能实时将数据传递给上位机,从而保证了数据的实时采集。



图 9 样机装置
Fig.9 Prototype device

表 1 耦合线圈参数
Tab.1 Coupling coil parameters

线圈匝数	线圈仿真电感量/ μH	线圈实测电感量/ μH
13	45.19	45.46
12	39.38	40.07
11	35.76	35.04
10	31.13	30.37
9	26.60	25.31
8	22.21	21.85
7	18.02	17.76
6	14.07	15.56

实验过程通过 RLC 串联谐振电路对磁耦合结构的耦合线圈进行调谐,通过装置测得谐振电路的阻抗,为了数据准确性,将试验分为 A、B 两组,A 组固定激励频率为 65 kHz,步进频率 100 Hz,激励电压 2 V,上位机设置的扫频点数为 10,试验过程调整耦合线圈的匝数从而改变耦合线圈的电感值,通过计算匹配电容电阻,使得 RLC 串联电路达到谐振状态,根据串联谐振电路特性,谐振状态时,电路中阻抗最小且为纯电阻,为了方便试验数据检测,实验过程采用阻值为 20 Ω 的贴片电阻,实验过程 B 组设定耦合线圈电感值 20 μH ,改变谐振式激励频率,其余参数设置不变,测试数据如表 2、表 3 所示。

表 2 定感值阻抗和相位测量数据
Tab.2 Constant inductance impedance and phase measurement data

样品电感/ μH	样品电容/ nf	样品电阻/ Ω	阻抗值 Z_1/Ω	测量阻抗值 Z_2/Ω	相位值 $\varphi_1/(^{\circ})$	测量相位值 $\varphi_2/(^{\circ})$
15.56	385.30	20	20.07	20.23	1.233	6.52
17.76	337.57	20	20.06	20.25	1.823	7.23
21.85	274.38	20	20.04	20.23	1.324	8.24
25.31	236.87	20	20.28	20.30	1.067	7.44
30.37	197.40	20	20.16	20.42	1.280	8.15
35.04	171.09	20	20.19	20.48	1.086	8.13
40.07	149.62	20	20.22	20.36	1.596	7.43
45.46	131.88	20	20.27	20.43	1.487	9.43

表 3 定激励频率阻抗和相位测量数据
Tab.3 Constant excitation frequency impedance and phase measurement data

激励频率/ kHz	样品电容/ nf	样品电阻/ Ω	阻抗值 Z_3/Ω	测量阻抗值 Z_4/Ω	相位值 Z_3/Ω	测量相位值 $\varphi_4/(^{\circ})$
20	3 160.28	20	20.154	20.623	0.50	2.65
30	1 407.23	20	20.015	20.323	0.45	3.55
40	791.57	20	20.095	20.424	0.41	4.60
50	506.60	20	20.003	20.117	0.35	5.20
60	351.80	20	20.036	20.135	0.51	5.60

4.3 数据结果分析

通过精密数字电桥设备测量阻抗和相位大

小,再通过实验装置测试阻抗和相位大小,通过表 2、表 3 的数据计算和比较,抗测量系统测量阻抗

的值比较准确,相对误差值波动在 $2\% \sim 5\%$,相位绝对值差波动在 $8^\circ \sim 10^\circ$,实验分析主要误差来源:

(1)所选用的电阻电容本身就存在一定误差,即使同种型号规格的器件由于生产工艺,也会存在本身的物理性质差异导致测量数据与标定数值的差异。

(2)实验过程由于线圈的绕制是人工绕制,难免会出现绕制不均匀、松动等现象,在耦合线圈实际测试过程中,会存在测量数据差异。

5 结论

本文通过 AD5933 阻抗测量模块,单片机 STC89C51 和 LabVIEW 软件相结合,方便快捷,硬件简易实现。测量误差在允许范围内,在实际测量中,具有实时采样,存储数据,成本低,具有很强的便携性和扩展性。在无线传输的谐振系统的设计过程,能够有效的提供数据测量,方便试验和线圈的绕制,补偿回路的测试等等,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 王国东,原璐璐. 无线电能传输系统谐振线圈优化设计[J]. 工矿自动化, 2014, 40(3): 53-56.
- [2] 李乐乐,肖园,汤轲. 基于 MSP430 的简易阻抗测量仪设计[J]. 科技视界, 2013(2): 103-104, 58.
- [3] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 1-13, 21.
- [4] 汪强,李宏,陈东旭. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的分析与设计[J]. 电源技术, 2012, 36(11): 1741-1744, 1750.
- [5] 陈逸鹏,聂一雄. 谐振式无线电能传输系统谐振线圈优化设计[J]. 厦门理工学院学报, 2012, 20(3): 62-66.
- [6] 郭琦. 电桥法测电阻的测量不确定度评定[J]. 工业计量, 2016, 26(2): 59-62.
- [7] 张亚辉. 基于 ARM 的阻抗测量系统的设计[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.
- [8] 祁雨,邢兰昌,刘昌岭,等. 基于虚拟仪器技术的阻抗分析仪设计与开发[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 19-24.
- [9] 汪强,李宏. 基于磁耦合谐振的无线电能传输系统的研究[J]. 电子技术应用, 2011, 37(12): 72-75.
- [10] 魏义虎,陈雷. 基于 LabVIEW-VISA 方式的串口通信研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(24): 129-131.
- [11] 李世红. 基于 LabVIEW 和单片机的温度监测系统的设计[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(19): 4836-4839.
- [12] 唐林林,赵秋明. LabVIEW 的串口转 WiFi 数据传输实现方法[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2015, 15(9): 26-28.
- [13] 王建勋,陈红军. 基于单片机和 LabVIEW 的串口控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 266-269.
- [14] 赵常寿,陈征祥,樊蓉. 基于 LabVIEW 和 NI-VISA 的 RS232 串口通信程序设计[J]. 电脑编程技巧与维护, 2015(1): 68-70.
- [15] 王聪,董秀珍,秦明新. 基于 LabView 的磁感应方式阻抗测量系统虚拟仪器接口的实现[J]. 医学争鸣, 2004, 25(20): 1905-1907.

(特约编辑:黄家瑜)