

一种高精度开关式电感测试仪的设计

雷冬阁¹, 赵军法², 叶汝夏², 周新光², 张博²

(1. 衢州学院 电气工程及自动化学院, 浙江 衢州 32400;

2. 浙江启超电缆股份有限公司, 浙江 衢州 32400)

摘要: 电感在现代电子电路中应用广泛, 大量的存在于滤波、耦合、振荡等电路中, 因此如果可以准确地测量电感的值具有重大的意义; 现今, 电感的测量大部分是用电桥法, 高精度的电桥测试仪器是比较昂贵的; 通过对电感的特点, 以及现有的测量方式进行了研究, 设计了一种高精度、低成本电感测试仪; 该仪器采用具有不同电流值的恒流源反复对电感进行正反向充电, 然后根据检测的不同电流值下的放电时间求取电感值取其平均值, 最后得出待测的电感值; 完成了恒流源充放电电路、电源电路、开关充放电电路、检测电路以及控制电路的设计; 该装置的电感测量误差在 $\pm 5\%$ 以内, 具有灵敏度高, 响应速度快、成本低等特点, 具有广泛的应用意义。

关键词: 电感测试; 开关式; 恒流源电路

Design of a High Precision Switch-type Inductance Tester

Lei Dongge¹, Zhao Junfa², Ye Ruxia², Zhou Xinguang², Zhang Bo²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Quzhou University, Quzhou 324000, China;

2. Zhejiang Qichao Cable Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

Abstract: Inductance is widely used in modern electronic circuits, and exists in a large number of circuits such as filtering, coupling and oscillation. Therefore, it is of great significance to accurately measure the resistance of inductance [1-2]. Today, the measurement of inductance is mostly measured by bridge method, high-precision bridge test equipment is more expensive. So this article designed a high-precision, low-cost inductor tester. The instrument uses different current value of the constant current source of the inductor for positive and negative charge, and then according to the detection of different current value of the discharge time to obtain the inductance value of its average, and finally get the measured inductance. Completes the design of constant current source charge and discharge circuit, power supply circuit, switch charge and discharge circuit, detection circuit and control circuit [3-4]. The inductance measurement error of the device is within $\pm 5\%$, which has the characteristics of high sensitivity, fast corresponding speed and low cost, and has wide application significance.

Keywords: inductance test; switch type; constant current source circuit

0 引言

电感器是一种将电能转化为磁能的储能元件, 在电路的设计中实现振荡、调谐、耦合、滤波、延迟、偏转等元件之一[1-4]。在电路中主要起到滤波、振荡、延迟、陷波等作用, 还有筛选信号、过滤噪声、稳定电流及抑制电磁波干扰等作用[5-6]。电感最常见的应用就是利用其“阻交流, 通直流”特点组成 LC 滤波电路[7]。电感的应用是十分广泛, 因此需要一种简单经济的方法对电感进行测量。目前常用电感测量方法有传统电桥法、谐振法[8-9], 数字智能测量方法电压比例法、电感-频率转换法、电感-一周转换法[10-11]。但是不管是传统的方法, 还是数字智能测量方法各有优缺点。例如采用电桥法要反复调节桥臂的值, 操作繁琐。采用谐振法操作简单但是的测量精度要低于电桥法。采用电压比例法和电感-频率转换法由于未考虑电感的损耗电阻的影响, 因此会影响测量精度[11-12]。电感-一周转换法由于频率稳定性较差, 并且未考虑损耗电阻的影响, 从而影响测量精度[13]。

另外目前大部分的电感测量方法只能在正弦波激励下测量

感抗且只能测试电感为定值的线圈[14-15], 而无法对非正弦状态下(也就是开关状态下)的电感进行测量, 而这种状态下的电感是大量存在并应用的, 因此需要一种可以满足这种需求的电感测试仪器, 基于此设计了一种可以较好测量开关状态下电感值得仪器。

1 系统结构及原理

该系统主要有 STM32 单片机作为控制中心的主控模块, 以及电源模块、显示模块、按键电路、可调恒流源电路模块、开关电路模块、信号检测转换电路模块、电感充放电电路组成。系统的基本框图如图 1 所示。在系统中控制核心采用 STM32F103VCT6, 其主要完成对信号检测电路采集的数据进行计算求出电感值。显示电路选用 LCD12864 来显示测量结果的电感值。按键电路主要是为了在测量不同电感时对电感类型进行选择。可调恒流源电路和开关电路是完成对电感充放电。信号检测电路完成对电流放电的检测。

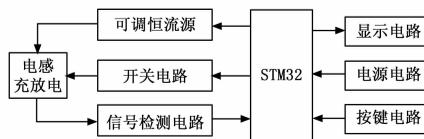


图 1 系统基本框图

收稿日期: 2017-05-14; 修回日期: 2017-06-07。

基金项目: 衢州市科技项目(2016D009)。

作者简介: 雷冬阁(1989-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事弱信号检测方向的研究。

系统的硬件组成如图 1 所示, 系统的工作原理如下: 系统工作时, 当电感插入测试端口时, 电感测试仪开始工作。首先通过 STM32 控制可调恒流源输出一个稳定的 100 mA 的电流, 然后通过 STM32 控制开关电路对电感进行正向充电, 充电时间大于 100 μs , 通过查找资料发现对于大部分电感在充电大于 100 μs 时, 其可以达到稳定状态。充电达到稳定后, 对电感进行放电, 通过信号检测电路测量其稳定放电时间。根据测量时间, STM32 单片机通过计算得出其电感值。完成正向充放电之后, STM32 控制开关电路对电感进行反相充放电, 反相充电同样在 100 μs 时达到稳定, 记录反相放电时间, 计算出电感值。在完成 100 mA 正反相充放电之后, 通过 STM32 控制恒流源改变恒流源的输出, 在设计过程选择在 100 mA 的左右各取两个值, 对每一个电流等级重复前文 100 mA 时电感的测量过程, 分别测量得出不同电流等级的电感值, 然后对电感值运用插值法进行处理求得测量电感值, 并在显示器上进行显示。此外本装置还具有自主学习得能力, 在电感的检测的过程中如果面对未知类型的电感本装置具有自主学习记忆功能, 当检测的电感类型和已知电感的类型都不同的时候, 装置可以自动检测并完成数据的拟合与处理, 处理完成之后将数据关系进行记忆保存, 在下次检测同类型的电感只需调用原有的数据关系计算即可, 节约了检测时间, 大大提高了电感测试仪的效率。

2 电路的设计与实现

系统的硬件电路设计过程中, 主要是完成对恒流源电路、开关电路、以及信号检测电路的设计, 其直接关系到电感测试仪的精度以及功能的实现。下面主要对这三个电路模块进行介绍。

2.1 开关充放电

系统采用如图 2 所示电路对电感进行充放电。开关充电电路有光耦、场效应管等组成。开关充过放电的原理是: 在电感的测量的过程中, 恒流源会输出一个设定的恒定的电流值。通过 STM32 控制光耦使得场效应管 1、4 导通, 2、3 断开, 达到为电感正向充电的目的。电感完成充电之后, 通过资料研究发现电感在 100 μs 内可以达到充电饱和状态, 然后对电感进行放电放电时 1 断开, 4 继续导通, 在放电的过程中检测稳定放电时间, 然后根据公式:

$$L_x = \frac{U_{DP}}{I_1 - I_2} \tau_D$$

计算出电感的值记为 X_1 。在完成正向充放电之后对电感进行反相充电, 反相充电时候 1、4 断开, 2、3 闭合, 达到反相充电的目的。反相充电完成之后, 2 断开, 3 继续导通。在放电的过程中检测稳定放电时间, 根据公式计算出电感值记为 X_2 。然后根据设定值改变恒流源的输入电流, 重复进行充放电操作, 记录不同电流等级下的电感值。将得到的电感值运用

插值法分析求出实际的电感值。

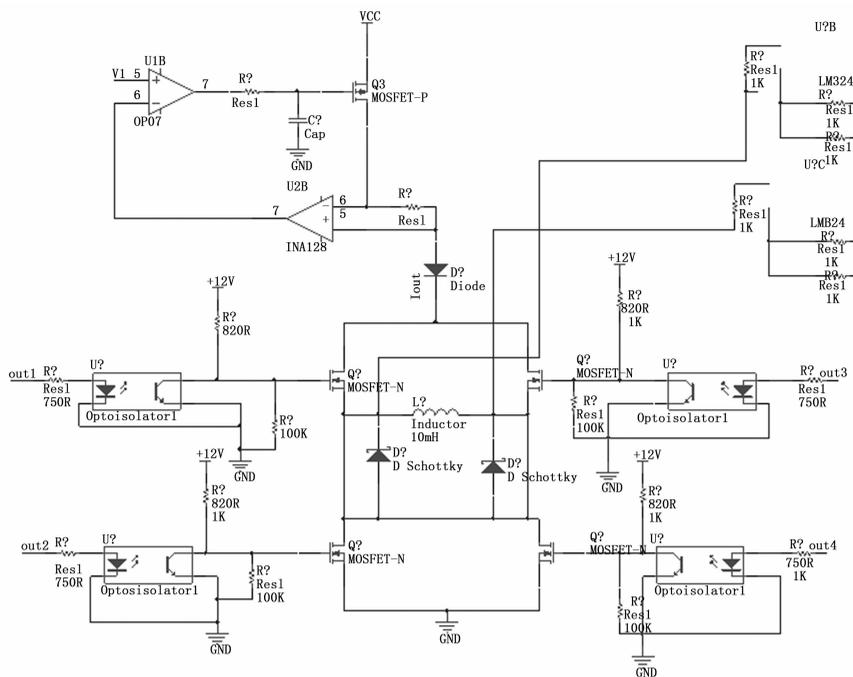


图 2 开关充放电电路

2.2 恒流源电路

设计中电感值得测量是通过运用恒流源对电感的正反向的充放电完成的, 因此恒流源对电感的测量具有重要的作用, 恒流源的输出稳定与否决定了电感测试仪的测量精度的好坏。恒流源按照采用的原理和使用的元器件的不同, 可以分为晶体管恒流源、场效应管恒流源、集成电路式恒流源。通过对这几种恒流源的设计电路和试验结果分析发现: 晶体管恒流源由于电流控制过程中控制器件的性能不好, 造成恒流源稳定性比较差, 精度不高。集成电路式恒流源往往电流的输出幅值有缺陷, 不能输出大电流; 对于场效应管其作为电压控制型器件, 其输入端的阻抗值很大, 因此可以用作恒流源, 但是其同样具有缺点。因此本文采用集成电路芯片和场效应管组合使用设计恒流源电路。恒流源电路如图 3 所示。

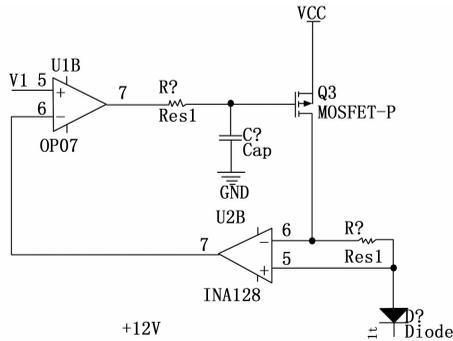


图 3 恒流源电路

综上所述可知恒流电路是电感测试仪系统是否满足设计精度的关键, 要求恒流源的电路输出电流要保持稳定, 在图 3 所示的恒流源电路中, 考虑到器件对恒流源稳定性的影响, 恒流源电路采用了高精度的仪表放大器 INA128 和稳定性好的线绕电

阻。电路采用线性反馈调节电路使得恒流源的输出稳定，恒流源电路的最大标准差低于 0.5 μV 。如图 3 所示恒流源电路有运算放大器 OP07，仪表放大器 INA128，场效应管以及线绕电阻组成。在 STM32 软件系统中已经提前设置了五个不同的电流等级值，系统正常的工作过程中，STM32 根据内部设置的电感值的大小依次调节 INA128 的输出电压与运算放大器 OP07 配合使用使得场效应管的输出电流稳定在设置值并对电感进行充电。通过系统的控制可以保证在每个电流等级下都可以对电感进行正向和反向充电。这里设计不同的电流等级主要是为了提高电感的测试精度，减小误差。

2.3 信号检测电路

信号检测电路主要是完成对电感放电是否完成进行检测。在电感的放电期间，对开关电路中电感放电所经过的二极管两端的电压模拟量进行检测，并将模拟量转换为 STM32 可以识别的电压信号。信号检测电路由信号放大和比较电路，以及信号选择电路组成。信号检测电路如图 4 所示。

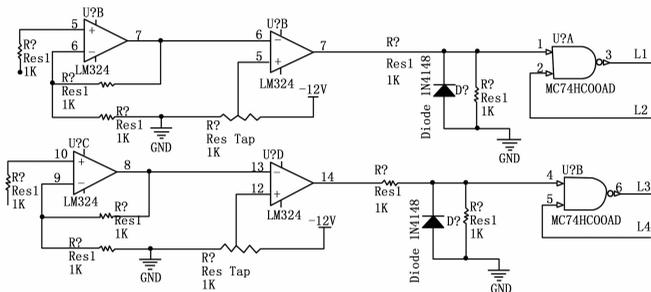


图 4 检测电路

信号检测电路如图 4 所示。首先由于二极管导通时候二极管两端的电压大小为 0.26~0.3 V，对于 STM32 来说他仅能够识别的是高低电压，因此通过放大电路可以将二极管两端电压进行放大比较，最终将二极管的导通和截止信息转化为 STM32 所能识别的高低电平信号。信号检测电路通过两路的与非门和比较电路检测电感放电的时间，当放电结束的时候由于二极管的存在使得电路截至，检测电路会检测到电平的变化据此可以得到电路放电结束的时间。定时器记录放电结束时间以用于代入公式计算电感。

2.4 STM32 控制电路和电源电路

控制电路的设计主要包括 STM32 的最小系统的设计，在设计的过程主要要考虑 STM32 的稳定工作以及对 STM32 抗干扰性做一定的处理。电源电路在是为系统提供稳定的工作电路，在这里设计的过程中考虑到信号检测电路和 STM32 电路、恒流源电路工作电压是不一样的，因此电源要具有不同工作等级电压的输出。另外在电路中要求恒流源的输出保持稳定、尽量不要波动。因此在设计的过程要求恒流源的输入电源的纹波要小，这里通过仿真对滤波电容

进行合理的搭配以达到降低纹波的目的。STM32 控制电路和电源电路如图 5 所示。

2.5 系统软件设计

软件设计是系统的关键部分，软件子程序主要包括定时器中断控制、外部输入中断控制、以及内部 ADC 控制采样程序。电感的测量过程中对电感正反向充电时间都在 100 μs ，这里采用定时器进行时间的设定。在放电完成之后通过外部中断触发内部定时器定时结束记录电感完成放电的时间。控制内部 ADC 完成对电感两端电压的检测。

3 试验结果与分析

本设计在完成电路设计之后，先在仿真软件上对部分电路进行仿真，仿真通过之后，在覆铜板上完成硬件电路的搭建，并对实验结果进行记录。数据见表 1。在试验的时候电感采用手工绕制，然后通过数字电桥测量其真值如下表第一行所示。第二行为开关电感式测量仪所测量出的数据。

对比表 1 可以发现，电感的测量值与真值之间存在一定的误差，通过上表分析可以发现当待测电感的值在 15~70 mh 范围之内，测量随着待测电感值的增加，电感测试仪的精度也在提高；随着待测电感值的减小，电感测试仪的精度降低。电感测试仪精度在 15~40 mh 内虽然精度降低但是总体维持在 $\pm 5\%$ 之内；在 40~70 mh 范围之内，电感测试仪精度可以维持在 $\pm 1\%$ 左右，可见此阶段电感测试仪的精度最高。待测电感的值小于 15 mh 时，通过实验中大量测试发现在此阶段电感测试仪的精度已经不满足 $\pm 5\%$ 的精度要求，由此可知此电感测试仪对小于 15 mh 电感的测量有明显不足。待测电感的值大于 70 mh 的时，电感测试仪的测量精度会随着电感值的增大而降

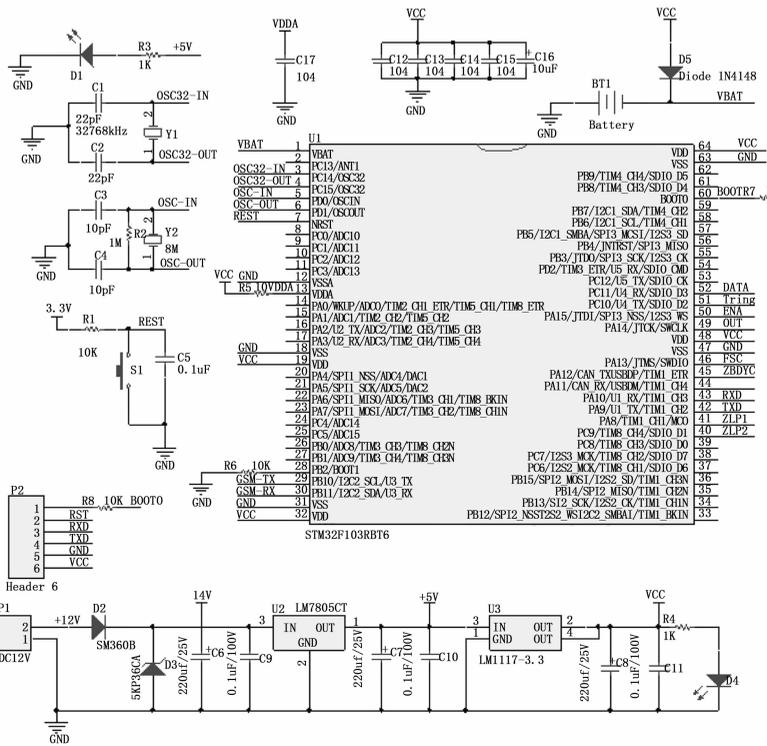


图 5 STM32 控制电路和电源电路

表 1 实验测试数据

真值	13.2	16.4	18.5	19.3	22.4	25.6	38.3	43.8	52.3	66.6	69.5	71.3	87.3	92.6	103.4	135.2
测量值	14.7	16.9	17.6	20.1	23.1	24.3	37.9	43.2	52.6	67.0	68.9	72.3	88.4	91.5	102.9	134.9

低, 但是通过实验发现在 100 mh 左右时整体上测量精度可以保持在 $\pm 5\%$ 之内。在输入待测电感值过大时已经无法满足设计的精度要求。

通过数据分析可以发现, 电感测试仪的性能还有待进一步提高。分析误差主要是有以下几个方面的原因造成: 1) 首先软件方面来说数据处理的算法有待进一步优化, 减小计算误差; 2) 其次恒流源电路的稳定性需要再次设计, 在测量的过程不可避免的受到恒电源不稳定波动的影响; 3) 另外由于设计中采用的是 STM32 自带 10 位 A/D 的进行转化, A/D 的分辨率有待进一步提高, 在改进方案中选择专门的 16 位 A/D 进行转换; 4) 最后考虑电路板和环境中干扰也会对结果造成一定的影响, 需要考虑进行干扰屏蔽处理。

4 结论

通过实验对比可以发现, 本设计完成了设计要求, 实现了电感值的检测的功能。通过本装置可以实现对电感的测量, 并且在电感值处于 15~100 mh 范围之内时, 可以保证测量的精度保持在 $\pm 5\%$ 之内, 并且在电感值处于 40~70 mh 范围之内, 电感测试仪精度可以维持在 $\pm 1\%$ 左右。通过以上分析可以发现电感值在一定的范围之内时, 本装置的测量精度是极高的。本装置具有原理简单, 使用方便, 性价比高的特点, 在一定使用的条件下特别是在小电感的检测领域内本装置可以广泛使用, 具有广阔的应用前景, 对电感的测量具有重要的实际应用意义。实际的使用过程中可以根据不同的电感类型通过按键选择对应的处理程序, 实现对不同类型电感的测量。同时本装置还运用学习算法实现对未知类型的电感自主学习记忆, 在以后的测量中如果遇到同种类型的电感可以节省测量时间。

参考文献:

[1] 李鑫, 郭玉峰, 郑鑫. 扫频式磁共振探测电感测量仪的研制[J]. 机械工程与自动化, 2016 (1): 155-157.

(上接第 297 页)

对比市面上目前已知的某款应用在无人机上的 GPS 数据记录设备, 该设计具有体积小、质量轻、功耗低 (整机功耗小于 1 W)、价格低等优点。

6 结论

本文设计实现了一种基于 C8051F020 和 CF 卡的 GPS 数据记录仪, 该记录仪具有体积小、重量轻、功耗低、可工作于恶劣环境等特点。通过上位机软件对记录数据的解析, 验证了该记录仪工作稳定, 可靠性高, 达到系统设计要求。

参考文献:

[1] 王锦, 刘鹏, 尹川等. 机载北斗/GPS/SINS 组合导航系统软硬件设计[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (3): 267-269.

- [2] 李一鸣, 荣军, 王岳斌, 等. 一种数字控制电感测量仪的设计与实现[J]. 电子器件, 2015 (5): 1210-1218.
- [3] 张保增, 李鹏, 潘泽阳, 等. 一种电动自行车充电桩的设计[J]. 微型机与应用, 2015 (6): 29-31, 34.
- [4] 东忠阁. 开关式电感测量仪的研究与设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [5] 韦炜. 新型电容电感测量仪的设计[J]. 现代科学仪器, 2013 (1): 69-72.
- [6] 何飞, 荣军, 黄广华, 等. 智能电阻电容电感测量仪的设计与开发[J]. 电子技术, 2013 (1): 63-65.
- [7] 江继延, 郭海生, 孙朝斌. 数字电感测量仪现场测量不确定度来源分析[J]. 计量与测试技术, 2012 (2): 51-52.
- [8] 徐华中, 周玉栋. 一种基于 DDS 的寄生电感测量仪设计[J]. 电子测量技术, 2011 (4): 14-17.
- [9] 肖鹏. 用于大型旋转机械转子故障监测的电感测量仪的研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [10] Luca Bruno. 构成廉价电感测量仪的单个 IC[J]. 电子设计技术, 2007 (11): 116.
- [11] 刘军, 李智. 基于单片机的高精度电容电感测量仪[J]. 国外电子测量技术, 2007 (6): 48-51.
- [12] 纪丽凤, 张廷辉. 简易电容电感测量仪的制作[J]. 辽宁师专学报(自然科学版), 2005 (4): 17, 75.
- [13] 邹义政. 数显电感测量仪[J]. 电子制作, 2004 (1): 49-50.
- [14] 王立新, 傅崇岗, 洪智凤, 等. 一种新型数字电感测量仪的设计[J]. 仪器仪表学报, 2001, (S2): 113-114.
- [15] 刘文红. 价值工程原理在高精深孔电感测量仪优化设计上的应用[J]. 机械设计与制造, 2001 (1): 83-84.
- [16] 余俊芳. 一款无振荡线圈的电感线圈短路测试仪剖析[N]. 电子报, 2014-07-13 (009).
- [17] 刘文啸. DC/DC 变换器中电感电流检测电路的设计[J]. 电子技术与软件工程, 2013 (19): 113.

[2] 陈磊, 梁强. GPS 原理及应用简介[J]. 科技信息: 学术研究, 2008 (22): 193-195.

[3] 李建清, 李彦岑, 李桂平. 基于 CF 卡的嵌入式存储设备的设计[J]. 电子设计与应用, 2005 (8): 108-110.

[4] CF+ and Compact Flash Specification Revision 1.4 [M]. Innodesk Company, 1999.

[5] 潘逐金. C8051F 高度 SOC 单片机原理及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.

[6] OEMV Family Firmware Reference Manual. OM-20000094 Rev6 [M]. NovAtel Company, 2008.

[7] 张辉, 王军民, 罗明璋, 等. 基于 C8051F060 的高速采集存储设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2011 (2): 16-18.

[8] 张承瑞, 王金川, 王恒. CF 卡与单片机接口设计及编程[J]. 山东大学学报工学版, 2004, 36 (6): 13-15.