

2023 年全国大学生电子设计竞赛

电感电容测量装置（C 题）



2023 年 8 月 5 日

摘 要

本测试仪以 AD9854 产生正弦输入信号，以 MSP432E401Y 微处理器、OPA656 精密运算放大器芯片与 AD8066 运放芯片构成的自平衡电桥作为元器件测量核心部分。MSP432E401Y 作为控制与处理核心，完成 DDS 正弦信号的控制和交流输出电压的 ADC 测量，同时驱动串口屏实现测量的控制与测量信息的显示。通过对采集到的信号做数字鉴相经过运算实现电容容值和 D 值的测量，并通过扫频实现电感参数的测量。本测量系统较好的完成了对电容量、损耗角正切 D、电感量和电感品质因数的测量，同时系统结构简单，测量精度较高。

关键字：MSP432E401Y;数字鉴相;自平衡电桥; LC 振荡;

目 录

1 方案论证.....	1
1.1 方案比较与选择.....	1
1.1.1 电容量和电容 D 值的测量.....	1
1.1.2 电感量的测量.....	1
1.1.3 电感 Q 值的测量.....	1
1.2 方案描述.....	2
2. 理论分析与计算.....	2
2.1 电容量 C 和电容 D 值.....	2
2.2 电感量 L.....	3
2.3 电感 Q 值.....	3
3 电路与程序设计.....	3
3.1 电路设计.....	3
3.1.1 电桥模块.....	3
3.1.2 双路独立仪表放大模块.....	3
3.1.3 信号调理电路.....	3
3.2 程序设计.....	4
3.2.1 软件设计流程.....	4
4. 测试方案与测试结果.....	4
4.1 测试方案.....	4
4.1.1 电容量及电容 D 值测试.....	4
4.1.2 电感量及电感 Q 值测试.....	4
4.2 测试结果.....	5
5 结论.....	6
参考文献.....	7
附录：电路原理图.....	8

1 方案论证

1.1 方案比较与选择

1.1.1 电容量和电容 D 值的测量

方案一：时常数法测量电容量：当在存在电容电路中加入阶跃电压，电容上电压即电路输出电压随充电时间 t 变化，由输出电压推出输出电压到达输入电压的 $2/3$ 大小的时间，由公式即可算得电容量 C 。通过锁相放大器测得电容 D 值。

方案二：采用自动平衡电桥法：接入 1kHz 正弦信号，采集电容两端的电压和流经电容的电流，计算得电容的阻抗值。同时 MSP432E401Y 通过 AD 同时采集电容两端的电压和流经电容两端的电流所转化的电压信号，对两路信号做数字鉴相，测得两路信号的相位差，即可得到电容 D 值，最后通过电容 D 值和测得电容的阻抗值计算得到电容量。

方案一时长测量有较大误差，精度较低；方案二电路结构更简洁，主要利用数字鉴相的软件方式处理数据，效率较高，故选择方案二。

1.1.2 电感量的测量

方案一：时常数法测量电感量：电感与固定电阻串联，依次连接施密特触发器、时间测量电路测量电阻电压，通过施密特输出的方波波形求得电感量。

方案二：选用 105 电容与待测电感并联再与电阻串联，使用 DDS 产生扫频信号，MCU 测得 LC 并联振荡的谐振频率，通过谐振频率公式即可计算得到电感量 L 值。

综上所述，方案一对晶振要求高，且电路中的元件如固定电阻，对测量结果产生影响，测量精度受限；方案二扫频方式用 AD 读取最大电压的方式避免硬件电路带来的误差。故选择方案二。

1.1.3 电感 Q 值的测量

方案一：将待测电感与一个已知电容并联，测量电感与电容并联后的谐振频率和品质因数 Q 值，通过在谐振频率时品质因数 Q 和已知的电容 Q_c 即可计算得到待测电感的 Q 值。

方案二：瞬态响应法测量电感的 Q 值：将待测电感与一个已知电容串联，接入一个脉冲信号源，通过 AD 采样观察电路的瞬态响应波形，测量波形的上升时间和衰减时间，即可计算出电感的 Q 值。

综上所述，方案二对电路和 MCU 测量精度要求较高且成本较高，方案一使

用简单的并联谐振的方法可以准确测量 LC 谐振的品质因数，电路简洁高效。

1.2 方案描述

本设计测量电容部分时在自动平衡电桥部分通过串联电阻得到电容两端的电压和电流的信号，即可计算得到电容的阻抗；将电流信号转为电压信号后又可通过 MCU 同时采集两个电压信号后做数字鉴相即可通过方波波形得到电容的损耗角正切 D。电感量的测量是通过并联谐振的来扫频得到谐振频率，通过谐振频率与电感量 L 的关系式即可求得电感量；同时，在谐振频率处可计算得到 LC 谐振电路的品质因数 Q，通过品质因数与已知电容的 Q_c 和待测电感的 Q_L 关系式即可得到电感的 Q 值。其中，双路独立仪表放大通过差分放大输出一路待测负载两端的电压和待测负载的电流转化后的电压。

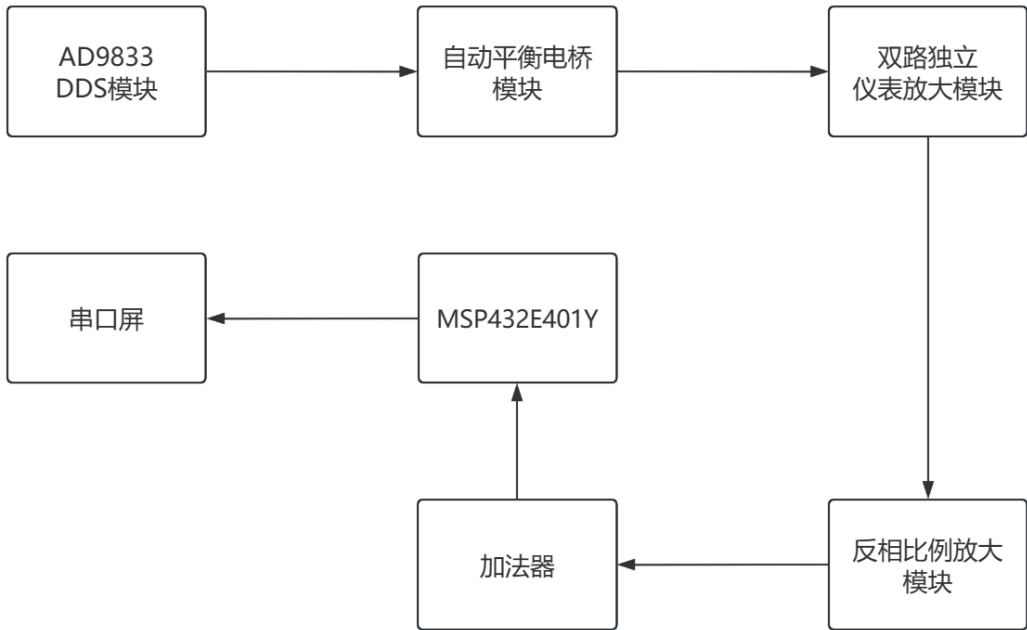


图 1-1 系统总体框图

2. 理论分析与计算

2.1 电容量 C 和电容 D 值

电桥部分根据电容量大小的不同，通过模拟开关选择相应合适的串联电阻大小，MCU 每个档位测量一次，根据信噪比确定档位。

$$\text{电容的阻抗 } |Z| = \frac{U_c}{I_c} \quad (1)$$

通过数字鉴相可得损耗角正切 D；

$$\text{电容量 } C = \frac{1}{2\pi f |Z| \cos \tan^{-1} D} \quad (2)$$

2.2 电感量 L

MCU 控制 DDS 输出扫频信号, 同时 AD 采集 LC 谐振电路两端电压, 当 AD 采集到的电压最大时, 说明到达谐振频率。即可利用谐振频率 f_0 与电感量 L 的关系式:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

求得电感量 L。

2.3 电感 Q 值

待测电感与已知电容并联谐振时, 通过品质因数 Q 和已知电容的 Q_c 值和待测电感 Q_L 的关系式:

$$Q_L = \frac{Q * Q_c}{Q_c - Q} \quad (4)$$

求得电感 Q 值。

3 电路与程序设计

3.1 电路设计

3.1.1 电桥模块

电桥模块采用自平衡电桥。待测元件与电路采用四线制开尔文接法可以在测量小阻值元件时最小化测量误差以取得高精度测量结果。器件受交流信号激励, 在高端监视施加到器件上的实际电压, 在低端由运放虚地 0V 驱动。因为量程电阻器的电流等于通过待测元件的电流, 所以可以达到自平衡的效果。

3.1.2 双路独立仪表放大模块

双路独立仪表放大模块采用宽带增益芯片 AD8066, 四路输入信号分别为前级电桥模块的差分输出, 所输出的两路信号即为待测阻抗两端放大后的电压信号和流经待测阻抗电流转化为电压放大后的电压信号, 以便于后续 MCU 采样。

3.1.3 信号调理电路

信号调理电路采用高通滤波器、反相比例放大器和加法器对信号进行处理, 以保证信号能以合理的幅度与信噪比供 AD 采样, 同时防止电压过高损坏单片机的 AD 采样芯片。

3.2 程序设计

3.2.1 软件设计流程

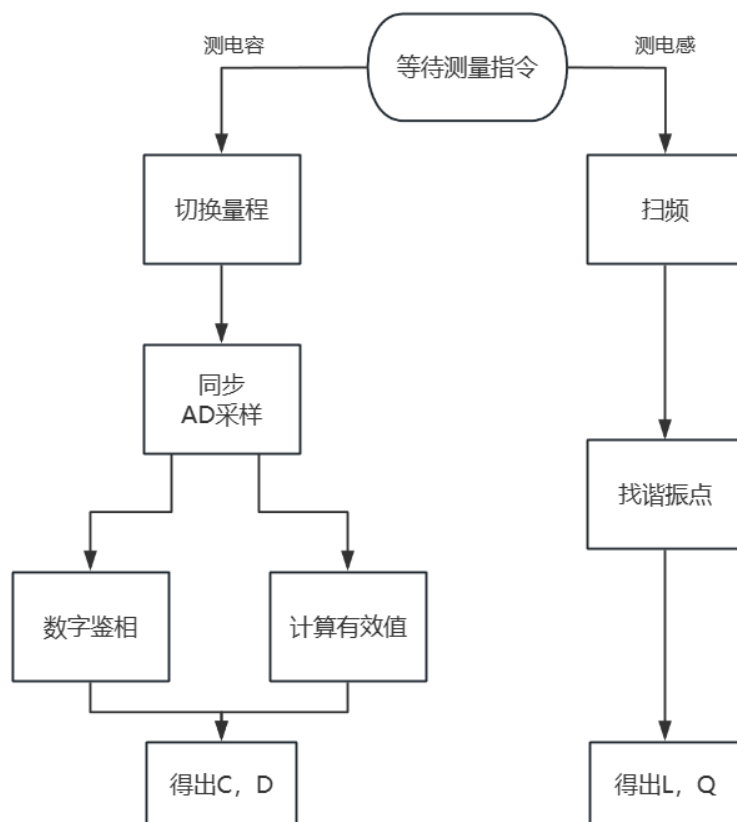


图 3-1 软件流程图

4. 测试方案与测试结果

4.1 测试方案

4.1.1 电容量及电容 D 值测试

测量电容量的输入激励为 300mVms，测量电容阻抗的串联电阻档位有 100K Ω 、10K Ω 、5K Ω ，用三个档位分别测量 1nF-100nF 间的电容，比较各电容各档位的测量时的信噪比。

4.1.2 电感量及电感 Q 值测试

测量电感量的输入激励为 300mVms，并联电容选择 105 电容，将题目提供的电感和 105 电容并联谐振的谐振频率搬移到较方便扫频的 5kHz-60kHz 频段，记录每次测得的 L 与 Q 与表测 L 与 Q。

4.2 测试结果

表 4-1 10k Ω 档电容量测量

电容/nF	测量值/nF	表测值/nF	测试电压/mV	档位/k Ω	测量 D	表测 D
1	1.46	1.26	300	10	0.007	0.0092
6.8	8	7.8	300	10	0.0088	0.0095
2.2	2.96	3.320	300	10	0.0055	0.0061
22	20.91	20.85	300	10	0.036	0.029
4.7	4.97	5.17	300	10	0.0079	0.0067
33	35.98	36.21	300	10	0.0099	0.0094
3.3	2.96	3.3	300	10	0.037	0.006
10	12.84	12.85	300	10	0.034	0.02
15	13.99	14.3	300	10	0.037	0.022
47	50.41	51.84	300	10	0.05	0.028
68	75.46	79.950	300	10	0.038	0.027
100	95.64	98.88	300	10	0.019	0.022

表 4-2 100k Ω 档电容量测量

电容/nF	测量值/nF	表测值/nF	测试电压/mV	档位/k Ω	测量 D	表测 D
1	1.34	1.26	300	100	0.007	0.0092
6.8	7.79	7.8	300	100	0.0087	0.0095
2.2	3.13	3.310	300	100	0.0056	0.0061
22	19.99	20.85	300	100	0.029	0.029
4.7	4.86	5.15	300	100	0.009	0.0067
33	35.66	36.21	300	100	0.0099	0.0094
3.3	2.86	3.3	300	100	0.031	0.006
10	12.49	12.85	300	100	0.038	0.029
15	13.85	14.3	300	100	0.038	0.028
47	50.03	51.84	300	100	0.05	0.028
68	77.12	79.650	300	100	0.033	0.027
100	94.98	98.88	300	100	0.02	0.022

表 4-3 5k Ω 档电容量测量

电容 /nF	测量值/nF	表测值/nF	测试电压/mV	档位/k Ω	测量 D	表测 D
1	1.27	1.26	300	5	0.009	0.0092
6.8	7.89	7.8	300	5	0.0079	0.0095
2.2	3.21	3.310	300	5	0.0055	0.0061
22	20.2	20.85	300	5	0.022	0.029
4.7	4.98	5.15	300	5	0.0045	0.0067
33	35.21	36.21	300	5	0.012	0.0094
3.3	3.36	3.3	300	5	0.009	0.006
10	12.79	12.85	300	5	0.025	0.029
15	13.98	14.3	300	5	0.037	0.028
47	49.91	51.84	300	5	0.034	0.028
68	75.12	79.650	300	5	0.029	0.027
100	94.6	98.88	300	5	0.021	0.022

表 4-4 电感量和 Q 值测量数据表

电感量/ μH	L 测量值/ μH	L 表测值/ μH	Q 测量值	Q 表测 值
10	9.8	10.02	5.79	4.51
15	15.13	14.55	7.75	5.89
22	21.99	22.34	4.86	5.55
33	32.56	31.30	5.11	5.34
68	75.64	76.01	9.99	9.67
100	98.25	96.22	6.8	7.25

5 结论

本测量系统较好的完成了对电容参数、电感参数的测量，通过不断分析数据和校准数据，实现了电容、电感参数的较精确测量，基本达到了赛题基础部分和发挥部分的要求。

参考文献

- [1]康华光. 电子技术基础. 模拟部分第六版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013. 12
- [2]张永瑞. 电子测量技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
- [3]Sergio, Franco. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [4]邓己媛, 陈松, 陈帅. 数字式高频 Q 表设计[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2021, 34(03): 18-23. DOI:10.16740/j.cnki.cn43-1421/n.2021.03.004.
- [5] [1]裴慧卿. 基于 MSP430 的手持式 LCR 数字电桥的设计与实现[D]. 北京交通大学, 2008.

附录：电路原理图

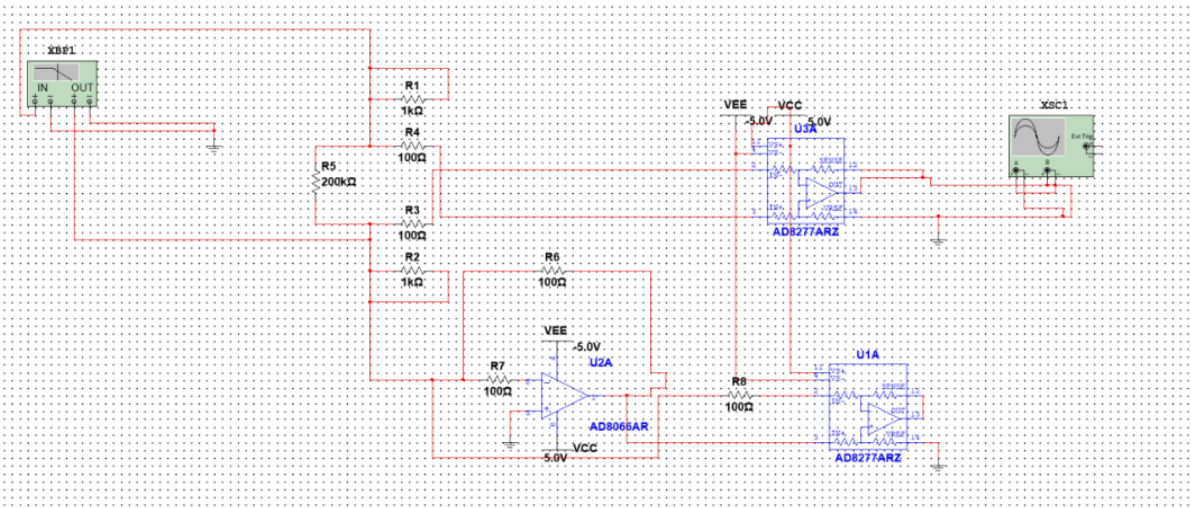


图 1 自动平衡电桥法测阻抗

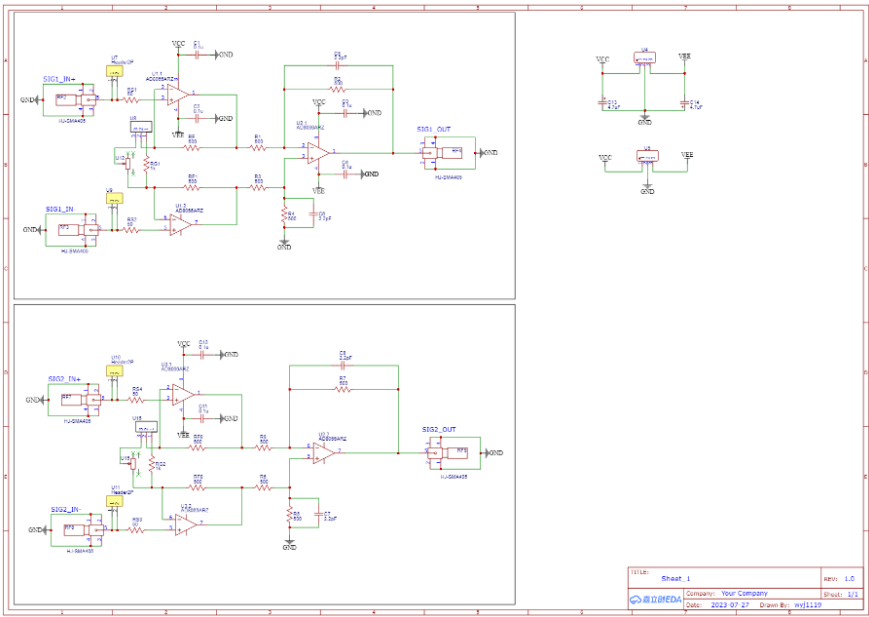


图 2 双路独立仪表放大电路

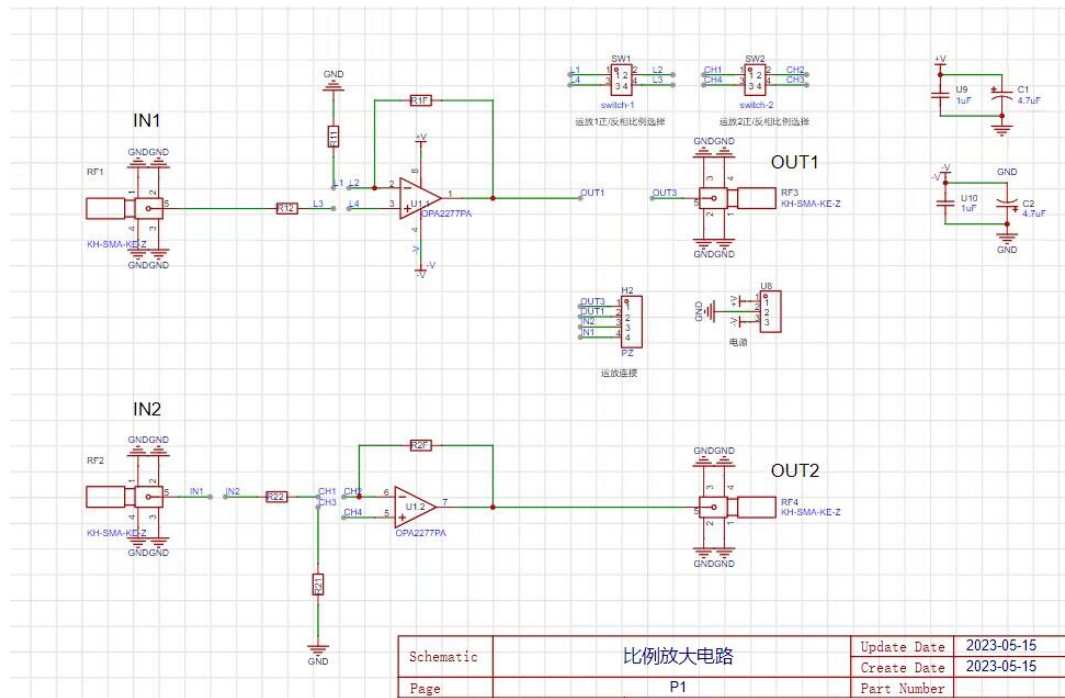


图 3 反向比例放大电路

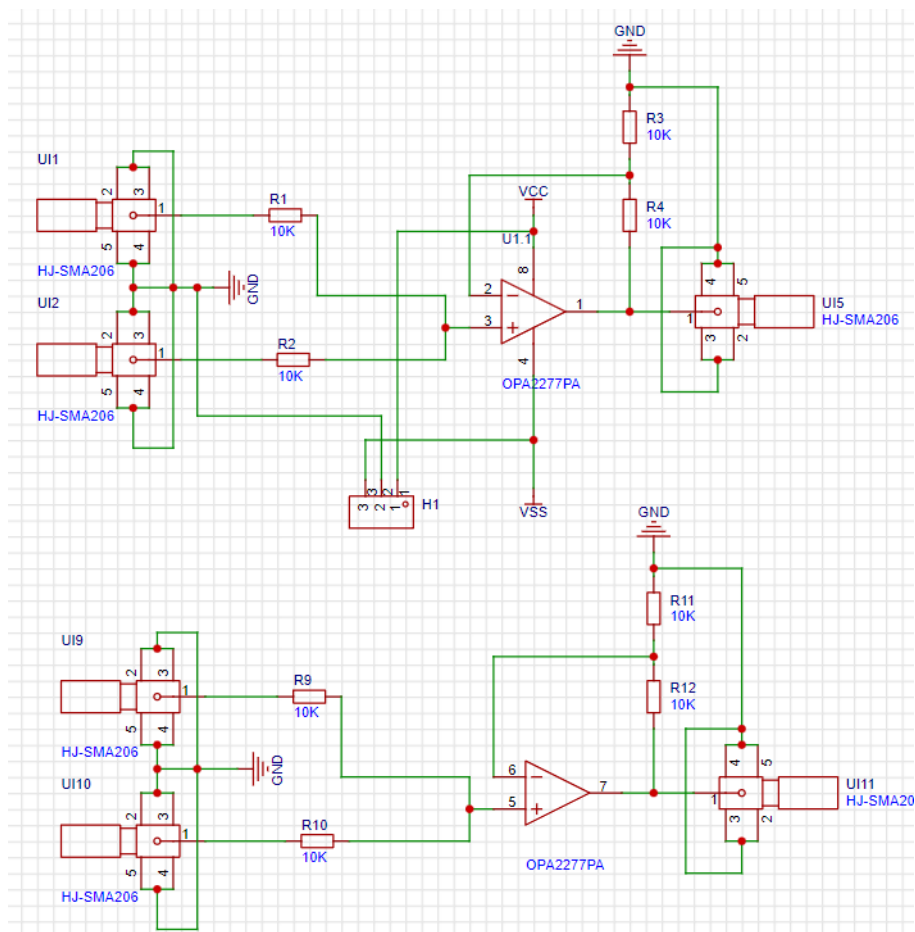


图 4 加法器电路