

智能电阻电容测量仪的设计与制作

刘俞辰

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要:为解决如今市场电阻电容测量仪器精度低, 成本高, 操作繁杂等问题, 提出了一种基于 STC89C52 的电阻电容智能测量方案, 系统在电阻测量方面可对 3 M Ω 以内的电阻进行测量, 采用 LTC1864 高精度十六位 ADC 采集电压计算电阻值, 通过单片机控制继电器实现电阻的量程自动转换; 在电容测量方面使用 NE555 芯片分别与 100, 100 k, 10 M 电阻组成多谐振荡器, 通过单片机计数器计算振荡频率, 实现多档位电容的测量, 量程 5 pF 到 500 μ F, 电容设置 pF、nF、 μ F 三挡, 使用简便; 数值通过 LCD1602 进行显示, 并显示对应的提示语句, 当超出量程时, 显示报警信息; 实验结果表明该系统内各量程电阻测量精度可达 0.09%, 各量程电容测量精度可达 1%; 该系统测量精度高, 成本低, 使用简便, 实现了系统智能的设计要求, 具有一定应用价值。

关键词: 电阻; 电容; 51 单片机; 智能

Design and Manufacture of Intelligent Resistance and Capacitance Measuring Instrument

Liu Yuchen

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to solve the problems of low accuracy, high cost, and complicated operation of the resistance and capacitance measuring instruments, a new method based on STC89C52 was proposed. The system uses LTC1864 high precision 16 bit ADC to collect partial voltage to calculate the resistance value in 3 M Ω , and realizes the automatic conversion of the measurement range through the combination of relay and single chip microcomputer. This work uses NE555 chip to form an unstable multiharmonic oscillator with 100, 100 k and 10 M resistor. By calculating the oscillating frequency with the single chip computer counter, the work achieves multi gear capacitance measurement in 5 pF to 500 μ F. The capacitance measurement sets pF, nF and μ F three gears, so it is convenient to use. The value is displayed on LCD1602, and the corresponding prompt statement is displayed. When the range is exceeded, the alarm information appeared. The experimental results show that the accuracy of the resistance measurement is up to 0.09%, the precision of capacitance measurement is up to 1%. The system has high measurement accuracy, low cost and simple operation, and realizes the intellectualization of resistance capacitance measurement. It has certain application value.

Keywords: resistance; capacitance; 51 single chip microcomputer; intelligence

0 引言

随着中国制造 2025 的提出, 电子产品受到了国家的高度重视, 智能化发展趋势已成定局。如今电子产业发展迅猛, 电子信息类从业者对电阻电容等参数的测量需求与日俱增。目前市面上的电阻电容测量仪存在操作复杂, 精度不足, 成本高昂等问题, 如何提高此类产品的自动化程度、测量精度, 减小体积, 降低成本成为了研究的主要方向。

本文介绍了一种采用 STC89C52 单片机作为主控芯片^[1], 使用高精度 16 位 ADC LTC1864 对待测电阻进行测量, 测量范围 0 至 3 M Ω , 单片机控制继电器实现量程的自动转换; 利用 NE555 芯片分别与 100, 100 k, 10 M 等电阻组成多个多谐振荡器, 采集振荡频率^[2], 完成对 5 pF 到 500 μ F 电容的测量。数据通过 LCD1602 显示出来, 并显示相应提示语句, 超出量程时, 显示屏提示报警。电阻测量

时将待测电阻插入插槽, 即可显示读数; 电容测量时, 只需判断其大致类型属于 pF、nF、 μ F 哪一种, 即可显示读数; 还增设了二极管导通判断功能。实验结果表明该系统内各量程电阻测量精度可达 0.09%, 各量程电容测量精度可达 1%。本测量仪具有自动化水平高, 测量精准, 使用简便, 成本低等特点, 解决了同类型产品价格高昂, 精度不准, 操作繁琐等问题。

1 系统整体设计

本设计以 STC89C52 单片机作为主控芯片, 由显示模块、按键模块、电容测量模块、电阻测量模块、ADC 模块、二极管模块和量程转换模块组成。

通过按键模块中的复位按键、模式按键, 单片机接收到使用者发出的控制信息, 凭借按键值选择测量模式, 当电阻测量时, 电阻测量模块采集的电压值模拟量经过 ADC 模块转化后得到数字量, 传递给单片机^[3], 与此同时单片机控制量程转换模块, 驱动三极管使继电器导通, 完成量程的自动转换; 当电容测量时, 单片机对电容测量模块中多谐振荡器的振荡频率进行计数; 测试结果输出到

收稿日期:2018-04-11; 修回日期:2018-05-15。

作者简介:刘俞辰(1997-),男,辽宁凌源人,主要从事仪器仪表测量技术方向的研究。

LCD1602 显示。

系统电路方框图如图 1 所示。

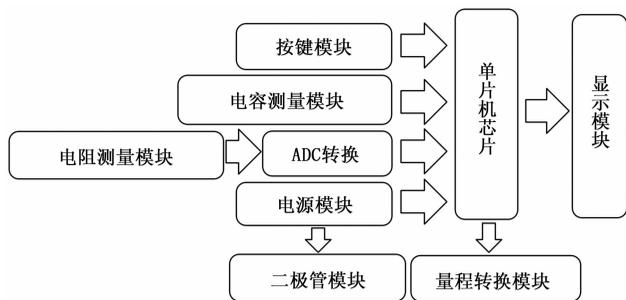


图 1 系统电路方框图

2 系统硬件设计

2.1 主控模块 (包含显示模块, 按钮模块) 设计

主控模块采用由 STC89C52 组成的最小系统, 包括复位电路, 时钟电路。STC89C52 采用了低功耗、高性能的 CMOS8 位微控制器, 具有 8 k 字节的系统可编程 Flash 存储器, 512 字节随机存取存储器, 4 个 8 位双向 IO 口, 看门狗定时器, 内置 4 KB EEPROM, MAX810 复位电路; 可调用 3 个 16 位定时器/计数器, 4 个外部中断, 以及一个 7 向量 4 级中断结构完成复杂操作; 利用全双工串行口进行数据传输、外设扩展, 最高运作频率可达 35 MHz^[4]。

在 STC89C52 单片机中, 要使单片机复位需要在晶振工作时, 在 RST 引脚上保持至少两个机器周期的高电平信号, 为满足本设计上电自动复位的设计要求, 本设计将 VCC 通过 10 μF 电容连接至 RST 引脚, 同时将 RST 引脚经过 500 Ω 电阻和地相连, 利用 10 μF 电容充电特点, 使 RST 引脚电压慢慢减小, 完成本设计上电自动复位的要求。

本设计时钟电路采用内部时钟方式, 将 12 M 晶振通过 19 脚、20 脚与单片机内部的高增益反向放大器相连, 同时接入 30 pF 的微调电容构成一个稳定的自激振荡器电路。

显示模块采用 LCD1602, 1602 采用标准的 16 脚接口, 其管脚说明如下。

第 1 脚: VSS 为地电源。

第 2 脚: VDD 接 5 V 正电源。

第 3 脚: V0 为 LCD 显示器的对比度调整端, 对比度高低与该脚电压大小成负相关, 对比度设置的不恰当会影响 LCD 数据显示, 使用时可以通过一个 10 k 的电位器调整对比度。

第 4 脚: RS 为寄存器选择端, 高电平时选择数据寄存器向 LCD1602 传输数据、低电平时选择指令寄存器对 LCD1602 进行指令控制。

第 5 脚: RW 为读写信号线, 与单片机的一个 IO 口连接, 当 RW 为低电平时, 进行写操作; 当 RW 为高电平时, 进行读操作。可与 RS 端配合, 进行更复杂操作, 如果不需要进行读取操作, 可以直接将其接 VSS。

第 6 脚: E 端为使能端, 当 E 端由高电平跳变成低电平时, 液晶模块执行命令。

第 7~14 脚: D0~D7 为 8 位双向数据线。

第 15~16 脚: 这两个引脚为 LCD1602 背光端, 在仿真中通常隐藏。

LCD1602 与单片机 P0.0—P0.7 及 P2.0, P2.1 和一排阻连接, 用于从单片机接收控制数据及显示数据; 在 LCD1602 的 3 脚连接一 10 k 滑动变阻器, 用于修改对比度^[5]。

按键控制模块中的模式选择按键由一按键和一 10 k 电阻组成, 其 SW 端连接至单片机 P3.3 脚。默认测量电阻, 当该按键按动, 即切换至电容测量。

主控模块原理图如图 2 所示。

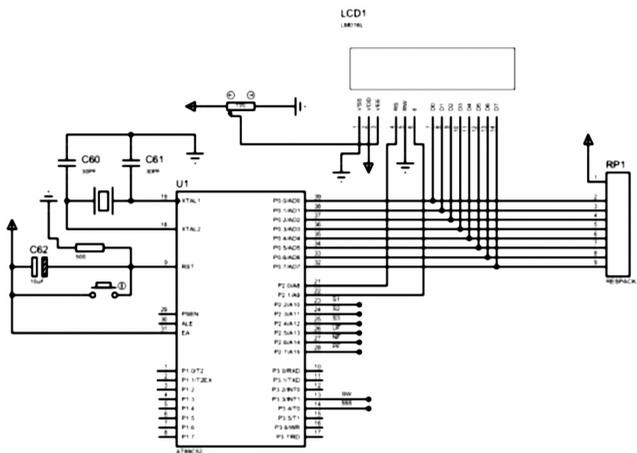


图 2 主控模块

2.2 AD 转换模块设计

本设计采用 LTC1864 作为 ADC 模块的主要芯片, 利用该芯片 16 位串行数据传输的特点, 配合 5 V 电压, 可达到 5/65535 的测量分辨率^[6]。该芯片采用单 5 V 电源供电, 可在 -20~+50 °C 的温度范围内工作, 最大采样率为 250 ksp/s, 随着采样速率的降低, 供电电流减小, 低功耗符合本设计要求。

LTC1864 共 8 个引脚, 在 proteus 软件中仅体现 6 脚, 其 1 脚参考电压端接 5 V VCC; 2 脚接收电阻测量模块的数据; 3 端接地, 与 1 端中间连接 0.1 μF 电容隔直; 5 (CONV)、7 (SCK)、8 (SDO) 脚分别与单片机 1、2、3 脚连接, 用于时钟及传送数据。

ADC 转换模块原理图如图 3 所示。

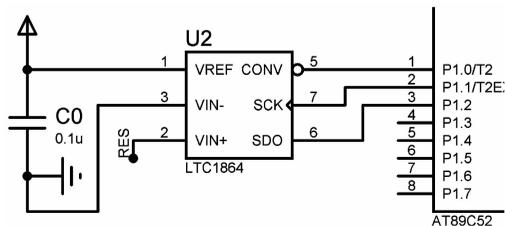


图 3 ADC 转换模块

2.3 电阻测量模块 (包含量程转换模块) 设计

本系统的电阻测量模块由基准电阻、三极管、稳压二

极管、继电器、反相比例运算放大器、电压跟随器和待测电阻组成。

反相比例运算放大器和电压跟随器中的运算放大器均采用 OP07 芯片，OP07 是双极性的运算放大器集成电路，具有低噪声、非斩波稳零、输入偏置电流低、开环增益高等特点，在高增益的测量设备和放大微弱信号传感器上广为适用。

不同于以往电阻测量设计中的比例测量法^[7]，本系统中反相比例运算放大器承担了采集待测电阻电压的主要任务，反相比例运算放大器没有共模输入信号，反相端虚地，输出电阻近似为零，大大减少了电阻测量中产生的误差。

如图 4 所示，当选择至电阻测量模式时，RX 待测电阻与基准电阻从大到小依次连接，直到单片机发出量程合适信号为止。当继电器导通时，在 U6 处的反相比例放大器将采集到待测电阻的负电压值，在 U4 处的 1:1 反相放大器将电压值由负值转换为正值，由于电压跟随器具有输入阻抗高，输出阻抗低的显著特点，最后在输出级通过 U41 处的电压跟随器将电压值传递给 ADC 模块中的 LTC1864，进行模数转换。

量程控制方面利用单片机控制 S1, S2, S3 处三极管基极的高低电平，从而控制继电器某一路导通与否，达到自动转换量程目的，其中 STC89C52 单片机端口的输出电流很小，不能直接驱动继电器，所以利用三极管进行放大，再用放大的信号去驱动继电器^[8]。

本设计所用继电器为欧姆龙公司 C6L 系列的信号继电器，具体型号为 G6L-1F-5 V。该继电器体积小，可高密度安装，减小了测量仪器体积，便于携带；稳定性极强，可保证触点快速咬合，减少故障的发生；接触电阻为 100 MΩ，消耗功率仅为 180 mW，符合本设计长续航的设计要求。

电阻测量模块原理图如图 4 所示。

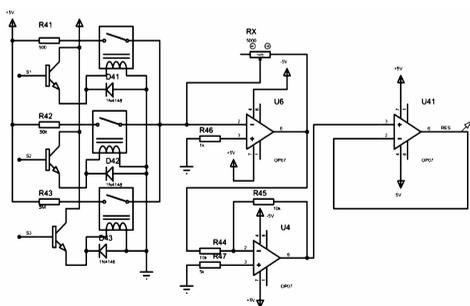


图 4 电阻测量模块

2.4 电容测量模块

本系统使用 STC89C52 单片机以及 NE555 芯片构成的多谐振荡电路进行电容测量^[9]。NE555 是一种多用途的数字-模拟混合集成电路，成本低，性能可靠，只需要外接几个电阻、电容，就可以实现单稳态触发器、多谐振荡器及施密特触发器等脉冲产生与变换电路。

在系统中，NE555 芯片分别与 100, 100 k, 10 M 电阻

组成多谐振荡器，在直接反馈无稳态的状态下工作，此时 555 芯片会输出一定频率的方波，其频率的大小与被测量的电容之间的关系是：

$$F = 0.722 / (RC) \tag{1}$$

式中， F 为振荡频率； R 为所选档位电路的阻值； C 为所要测量电容值。

如果电阻值确定，使用单片机定时一秒钟，用单片机的计数器测量出相应方波的频率，就能得到电容的大小。

NE555 IN 端连接单片机 P3.5, μF 端连接 P2.5, nF 连接 P2.6, pF 连接 P2.7。

电容模块中的换挡电路由 3 个挡位组成，将电阻串接在 NE555 芯片 3, 6 脚之间，通过改变电阻值进行挡位的调整，并使用 LED 灯提示。

其中 C 为待测电容，根据公式 (1)。

当 SW1 闭合时，电阻 R 的值是 100 欧姆，公式改写为：

$$F = 0.00722 / C = 7220 / (C * 1 \mu F) \tag{2}$$

该档位可以测量 μF 级别的电容。

同理，当 SW2 闭合时，电阻 R 的值是 100 k 欧姆，此时多谐振荡器中 RC 的数量级不变，振荡频率仍在单片机可测范围内，由此可以测量 nF 级别的电容。

同理，当 SW3 闭合时，电阻 R 的值是 10 M 欧姆，由此可以测量 pF 级别的电容。

电容测量模块原理图如图 5 所示。

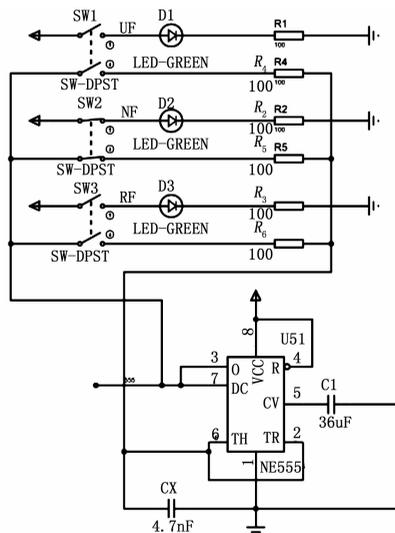


图 5 电容测量模块

2.5 系统电源设计

实物制作时，需考虑采用何种供电方式如何供电，本设计大部分为典型数字元器件，供电要求都为 +5 V 或 -5 V，由于基准电压决定着电阻测量模数转换的精度，其中 LTC1864 对供电要求尤其严格。

LM385 系列为微功率二端带隙稳压器二极管，具有非常低的动态阻抗、低噪声、稳定性强等特点，可随时间和温度的变化而稳定工作，使用方便，用途广泛。

本设计采用 9 V 方电池，通过电压基准芯片 LM385—5V0 得到 +5.00 V 基准电压，5 V 电压通过电源极性转换器 ICL7660，产生 -5 V 电压，从而实现 OP07 的双极性供电要求。

3 系统程序设计

系统程序设计采用模块化设计方法^[10]。整个程序由主程序模块、ADC 转换模块、电阻测量模块、电容测量模块、延时模块、计数器模块、定时器模块、中断模块、LCD 显示模块等模块组成。其中最主要的是主程序、ADC 转换模块、电阻测量及电容测量程序设计。

3.1 主程序流程图

当系统上电之后，单片机开始初始化操作，默认按键值为 1 进行电阻测量，按动一次 mood 模式按键后，按键值改变为 2 进行电容测量，而二极管模式上电即运行，不需程序控制，仅需将待测二极管按提示插入相应位置，若二极管导通，即蜂鸣器发声提醒。

主程序流程图如图 6 所示。

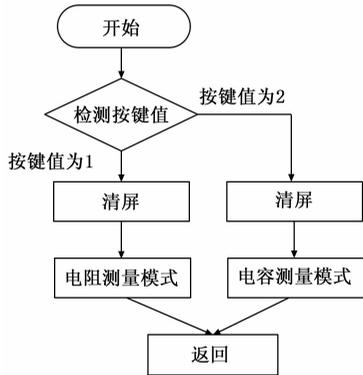


图 6 主程序流程图

3.2 电阻测量 16 位 ADC LTC1864 子程序设计

在 ADC LTC1864 子程序中，需先将 CONV 端置高电平，打开 ADC 转换，再将 CONV 置低，并延时几微秒，判断 16 位采样值是否为 1，再将该数据传入单片机中。

LTC1864 子程序流程图如图 7 所示。

3.3 电阻测量子程序设计

电阻测量子程序是通过调用 ADC 采样程序，对所测电阻范围进行大致估计，同时依据 ADC 最大档位采样后的值进行档位选择，将继电器换到合适的测量档位，为减小误差，五次调用 A/D 采样子程序五次读取 A/D 采样值取平均值，经过数据处理，最后将数据显示在 LCD1602 上。

交流电压通过整流、滤波得到的直流电压会因滤波不充分，含有剩余的交流成分；直接使用电池供电，也会因负载波动而产生波纹。由于存在波纹电压，基准电压源波动，从而会影响到 LTC1864 的基准电压，导致电阻测量产生误差。

本设计在电阻测量数据处理上引入数据结构的思想，利用 LTC1864 转换速度快的特点，建立数组短时间存储大量电阻测量数据，使用快速排序法，任取其中一个测量值

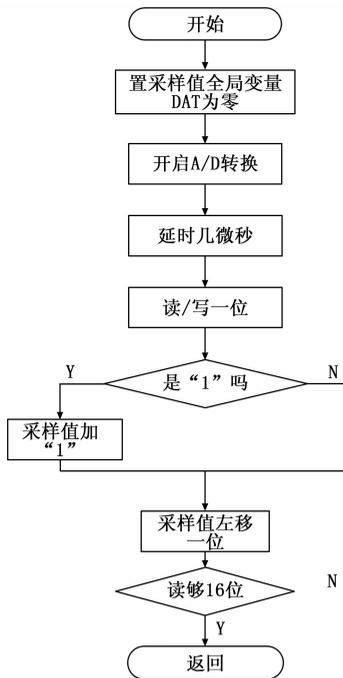


图 7 16 位 ADC LTC1864 子程序流程图

作为中心，所有比它大的值一律前放，所有比它小的值一律后放，从而形成左右两个子表，在各子表重新选择中心值，依此规律调整，直至每个子表元素只剩一个，完成对电阻测量数据的大小排序。该序列的中心值即为最接近实际值的测量结果。

该快速排序法每趟可确定多个元素位置，并且成指数增加，可十分快速地完成排序，不会对实际使用产生任何影响。电阻测量流程图如图 8 所示。

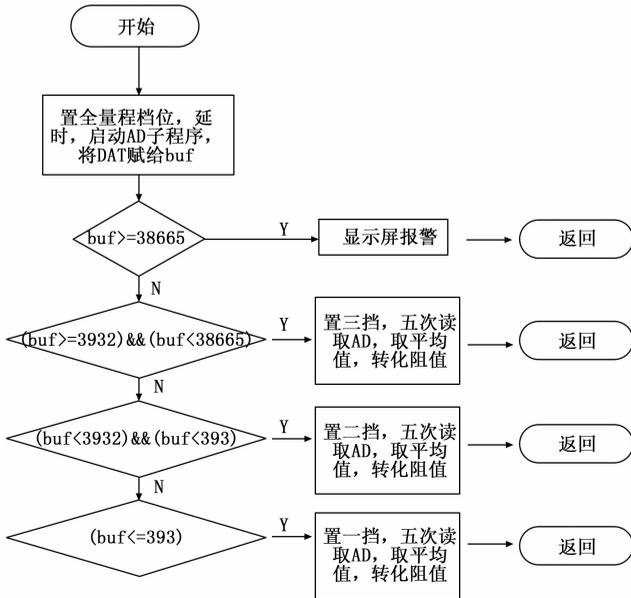


图 8 电阻测量程序框图

3.4 电容测量子程序设计

电容测量子程序是利用单片机的定时计数器，配合中

断来完成。STC89C52 单片机内部有两个定时/计数器 T0 和 T1，其基本功能都是加 1。通过设定单片机寄存器数值，可利用定时器进行定时；利用计数器对外部事件下降沿计数。我们使用定时器定时一秒钟，计数器在此期间内增加的数值就是 555 多谐振荡器方波的大小，将得到的频率依据公式 (1) 处理，最后将数据显示在 LCD1602 上。

电容测量流程图如图 9 所示。

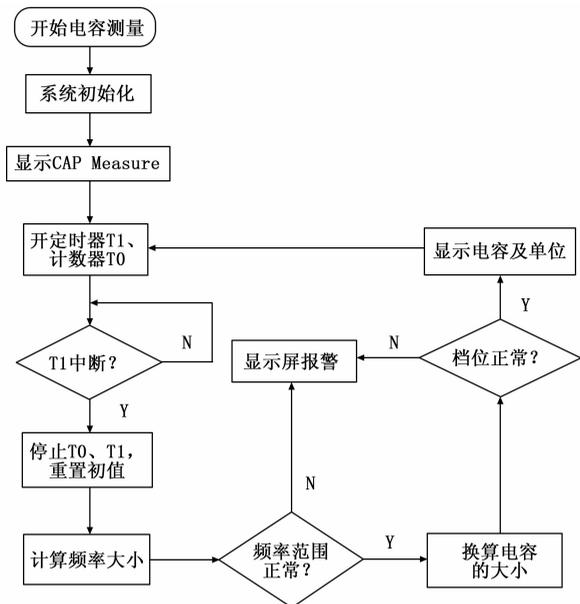


图 9 电容测量程序框图

4 测试结果

4.1 实验步骤与方法

为了测试该智能电阻电容测量仪的运作情况及测量精度，先在 proteus 软件中画出本设计仿真电路图，再利用 proteus 软件将待测电阻电容参数修改，得到仿真测试数据^[1]。

仿真环节结束后进行实物制作测试环节，通电本系统开始工作，首先将想测量的电阻电容插入相应的槽内，默认先开始进行电阻测量，按动 mood 模式键后，进行电容测量，再按动 RC 复位键，即可又回到电阻测量。二极管导通测量则独立于电阻电容测量，无需按键控制，直接将二极管放在相应位置即可，导通即会蜂鸣器发声。

4.2 实验数据

电阻、电容的仿真结果分别如表 1 表 2。

电阻、电容的实测结果分别如表 3 表 4。

表 1 电阻测量仿真数据 Ω

理论值	500	1000	5000	10000	20000	25000
测量值	499	999	5005	10009	20018	25023

表 2 电容测量仿真数据

理论值	68pF	100nF	33 μ F
测量值	68pF	99nF	33.4 μ F

表 3 电阻实测数据 Ω

理论值	100	500	5000
实测值	99	499	4989

表 4 电容实测数据

理论值	680pF	68nF	33 μ F	100 μ F
实测值	639.3pF	68.53nF	34.69 μ F	101.0 μ F

实验结果分析：

从表 1 和表 2 可知，电阻仿真精度最高可达 0.09%，电容测量精度在 1% 以内。操作中无需手动切换档位，实现了量程的自动转换。

在实际电阻测量环节中选用高精度千分之一误差的电阻 500, 5 k 进行测试，从表 3 可知，本系统在电阻实测中依然具备高精度的特点；在电容实测时由于待测电容本身精度不足，造成表 4 中偶尔测量误差略大。

此外，由于实际制作中各元件间难免存在干扰，其中干扰对电容测量的影响最大，针对此问题，在得到大量电容仿真数据的基础上，通过电容实测值与仿真值的对比较正，依据最小二乘法，估计干扰比例系数，再对程序进行修改，使电容测量误差大大减小。另一方面，由于电源本身输出电压存在微小波动，也会导致实测值与仿真值稍有不同。

5 结束语

本智能电阻电容测量仪是以 STC89C52 单片机为操作核心，在电阻测量方面采用 LTC1864 高精度十六位 ADC 采集电压计算电阻值，使电阻测量精度大大提高，其中仿真精度可达 0.09%，通过单片机控制继电器实现电阻的量程自动转换，操作简便；在电容测量方面使用 NE555 芯片分别与 100, 100 k, 10 M 电阻组成多谐振荡器，通过单片机计数器计算振荡频率，实现宽量程电容的测量，操作简单，精度高。该电阻电容测量仪操作界面仅有两个按键，大大简化了操作流程，易于上手。除此之外，该电阻电容测量仪所采用的元件结构简单，造价低廉，总成本约为 50 元，远低于同功能相似产品，易于推广。

参考文献：

- [1] 朱 军. 数字多用表的设计 [D]. 南昌：华东交通大学，2011.
- [2] 赫建国，刘立新，党剑华. 基于单片机的频率计设计 [J]. 西安邮电学院学报，2003，8 (3)：31-34.
- [3] 张永瑞，刘振起，杨林耀. 电子测量技术基础 [M]. 西安：西安电子科技大学出版社，1994.
- [4] 刘南平. 现代电子设计与制作技术 [M]. 北京：电子工业出版社，2004.
- [5] 宋雪松. 手把手教你学 51 单片机 (C 语言版) [M]. 北京：清华大学出版社，2014.
- [6] 余孟尝. 数字电子技术基础简明教程 [M]. 北京：高等教育出版社，1999.

- [7] 李国厚, 杨青杰, 陈艳锋. 基于单片机的数字多用表的设计 [J]. 仪表技术, 2005 (2): 26 - 27.
- [8] 孙肖子, 张企民. 模拟电子技术基础 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [9] 庄绍雄, 张迎春. 单片机控制的电阻电容在线测量仪 [J]. 电

- 子测量与仪器学报, 1993, 7 (4): 40 - 45.
- [10] 谭浩强. C 程序设计 (第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [11] 徐爱钧. 单片机原理使用教程-基于 Proteus 虚拟仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

(上接第 296 页)

幅值的影响。为明确参数激励信号与 MEMS 环式振动陀螺驱动响应信号的具体关系, 本文通过调节衬底电压 V_{dc} 和参数激励信号 V_p 的幅值, 多次实验记录数据。测试结果如表 2 所示, 为从表中得出数据变化规律, 将实验数据整理后, 绘制效果图像, 可得图 9。以驱动信号的下降比例直观反应参数激励法的效果。

表 2 实现参数激励后的驱动信号幅值数据

$V_{dc}/V \backslash V_p/V$	1.5	2.5	3.5
0	0.4795	0.1513	0.1077
0.5	0.4575	0.1452	0.1018
1.0	0.4513	0.1402	0.0963
1.5	0.4392	0.1327	0.0966
2.0	0.4322	0.1335	0.0917
2.5	0.4285	0.1302	0.0902
3.0	0.4096	0.1244	0.0871
3.5	0.3963	0.1220	0.0832

图 9 中曲线由表 2 数据拟合得到, 从拟合曲线中可以看出, 衬底电压 V_{dc} 和参数激励信号 V_p 幅值确实对参数激励的效果有极大影响。在衬底电压 V_{dc} 一定时, 随着 V_p 的上升, 参数激励对陀螺仪的驱动信号增益效果逐渐加强, 驱动信号 V_f 下降比例增大, 最终可将驱动信号降低 22.75%。同时, 随着衬底电压 V_{dc} 的增加, 相同参数激励信号 V_p 对驱动信号减小效果逐渐增大, 符合前文理论推导。

和衬底电压, 可实现对驱动信号幅度的调控, 有效抑制从驱动模态到敏感模态的电馈通噪声。实验表明, 参数激励法对减小驱动信号幅值以到抑制因电极间寄生电容导致的驱动端对敏感端产生的误差信号有显著效果, 实现陀螺仪灵敏度的提高。

但由于目前器件结构等方面的限制, 本文中的驱动方法还有进一步的研究空间。例如, 优化电路设计, 使陀螺接口板能够施加更高的衬底电压, 数字接口电路能输出更高的参数激励信号幅值, 提高对驱动信号的抑制效果; 优化数字闭环控制系统中的控制参数, 改进参数激励的控制结构, 提高驱动幅值和相位的稳定性; 可尝试将参数激励运用到振动陀螺的检测模态中, 放大检测模态响应信号, 提高系统信噪比。最后, 参数激励法应用对象不仅仅局限于环式陀螺中, 驱动方式是“变间距”产生静电力的陀螺都可以运用参数激励。因为这种驱动方式下, 静电力包含驱动力和弹簧力两部分, 而正是弹簧力使系统的刚度实现静电调制。故, 可尝试对音叉陀螺等实现参数激励法驱动。

参考文献:

- [1] 施 芹. 提高硅微陀螺仪性能若干关键技术研究 [D]. 江宁: 东南大学, 2006.
- [2] 王晓雷. 硅微陀螺仪闭环检测与正交校正技术与试验 [D]. 江宁: 东南大学, 2014.
- [3] 尚慧琳, 张 涛. 参数激励驱动微陀螺系统的非线性振动特性研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36 (1): 102 - 107.
- [4] Gallacher B J, Burdess J S, Harish K M. A control scheme for a MEMS electrostatic resonant gyroscope excited using combined parametric excitation and harmonic forcing [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2006, 16 (2): 320 - 331.
- [5] 于得川, 何汉辉, 周 鑫, 等. 嵌套环式 MEMS 振动陀螺的静电修调算法 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36 (7): 134 - 137.
- [6] Harish K M, Gallacher B J, Burdess J S, et al. Simple parametric resonance in an electrostatically actuated microelectromechanical gyroscope: Theory and experiment [J]. C Journal of Mechanical Engineering Science, 2008, 222 (1): 43 - 52.
- [7] Hu Z, Gallacher B J, Harish K M, et al. An experimental study of high gain parametric amplification in MEMS [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2010, 162 (2): 145 - 154.
- [8] 虞嘉欣. 硅微机械陀螺数字测控系统的算法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [9] 王展飞, 鲁文高, 李 峰, 等. MEMS 振动陀螺闭环自激驱动的理论分析及数值仿真 [J]. 传感技术学报, 2008, 21 (8): 1337 - 1342.
- [10] 曹慧芳, 吕洪波, 孙启国. 基于 MEMS 陀螺仪的随机误差分析 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 178 - 181.

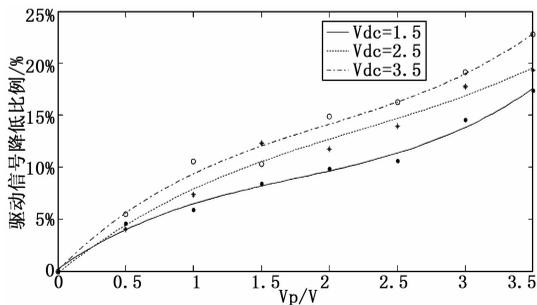


图 9 驱动信号下降比例

6 结束语

本文以 MEMS 环式振动陀螺的驱动方式为研究主题, 以降低驱动模态对敏感模态的电馈通为研究目的, 对 MEMS 陀螺的传统 PLL-AGC 闭环驱动方式进行了改进, 实现以参数激励法对 MEMS 环式振动陀螺的驱动。在保持驱动模态响应幅值不变的情况下, 通过调整参数激励信号