

便携式微小电容测试仪的设计

段文浩, 马 鑫, 耿卫国

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 为了便于测量液体火箭发动机试验台贮箱中电容式液位计的电容值, 设计了一种便携式电容测量仪。该系统是一款基于 MSP430F449 微控制器的数字便携式测试仪表, 通过利用单片机内嵌的 12 位高速 A/D 转换器, 实现高精度数据采集, 通过 LCD12864 实现电容值的显示。分别从电容检测原理、系统硬件电路设计和微控制器软件编程三个方面详细阐述了该智能测量仪器的设计原理和实现方法。该仪表具有三端测量功能, 可测量带长线缆的电容式传感器的电容值。电容测量范围为 10 ~ 9 999 pF, 精度可达 1 pF。

关键词: 电容测试; 便携式; MSP430 微控制器; 智能仪器

中图分类号: V433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2019)02-0085-04

Design of portable miniature capacitance tester

DUAN Wenhao, MA Xin, GENG Weiguo

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to conveniently measure the capacitance value of the capacitance level gauge in the tank of the liquid rocket engine test bench, a portable capacitance measuring instrument was designed. The system is a digital portable test instrument based on MSP430F449 microcontroller. It realizes high-precision data acquisition by using 12-bit high-speed A/D converter embedded in the single-chip microcomputer, and displays the capacitance value through LCD12864. In this paper, the design principle and implementation method of the intelligent measuring instrument were elaborated from three aspects: capacitance detection principle, system hardware circuit design and microcontroller software programming. The instrument has a three-terminal measuring function that can measure the capacitance of a capacitive sensor with a long cable. The capacitance measurement range is from 10 ~ 9 999 pF with accuracy of 1 pF.

Keywords: capacitance measurement; portable; MSP430 microcontroller; intelligent instruments

0 引言

在测量液体火箭发动机试验台贮箱中液位计的电容值时需要用台式电容变换仪, 该仪器体积大

并且需要接 220 V 交流电源, 使用该仪器到贮箱顶部进行测量极为不便。另外, 该仪器所测数据不能快速读出, 需要一段时间待其结果稳定后才能读数, 使得现场的测试工作费时费力。现有美国制造

收稿日期: 2017-12-12; 修回日期: 2018-06-06

作者简介: 段文浩(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为火箭发动机试验测控技术

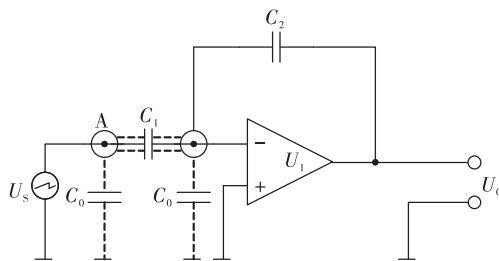
的手持式电容测试表,但不具有三端测量功能,所测结果不准确^[1],不能满足现场测试需要。为此需要设计一种具有快速、精确、便携和低成本特点的便携式电容测试仪,作为现场维修调试专用测试设备。

根据液位计电容值测量的需要,设计开发了手持式电容测试仪,该电容测试仪采用已有的三端法测量(第三端为屏蔽防护端),可以消除由导线引入的分布电容,其电容检测电路充分考虑电容传感器的引线电容、电路设计的寄生电容以及环境变化等影响因素,并辅以 MSP430 单片机的数字化修正,克服了小电容测量中寄生电容及环境对电容传感器的干扰,实现了 pF 级微小电容的测量。

1 电容检测原理

常见的电容测量电路有:充/放电电容测量电路、AC 电桥电容测量电路、比例运放式电容测量电路、基于 V/T 变换的电容测量电路、基于电荷放大原理的电容测量电路以及一些专用集成电路电容测量芯片,如 CAV424 等。相比较而言,比例运放式电容测量电路是目前实验室应用最好的检测电路,这种电路的特点是响应速度快、抗杂散性好、分辨率高,由于采用交流放大器,所以具有低漂移、高信噪比特点,但电路较复杂,成本高。

采用比例运放式测电容法进行电容-电压转换能够较为理想地消除长线分布电容的影响^[2-5]。比例运放式测电容的原理示意图如图 1 所示。



U_s —正弦波信号源电压有效值; U_1 —运算放大器; U_0 —输出信号电压有效值; C_0 —长线分布电容; A—屏蔽层; C_1 —待测电容; C_2 —标准电容。

图 1 比例运放式测电容的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of proportional operational amplifier test capacitance

如图 1 所示,在正弦波信号源内阻很小, U_1 输入阻抗很高且输出阻抗很小时, C_0 两端的电位相

等,也就是说,通过将传输电缆的屏蔽层与仪器的地电位信号相连接,这种接线法使传输电缆的芯线与屏蔽层等电位,消除了芯线对屏蔽层的容性漏电,从而去除了分布电容的影响。图 2 是电容检测电路的原理框图^[6]。

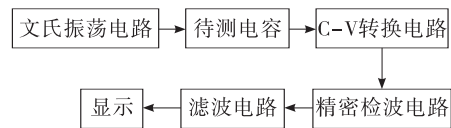


图 2 电容检测电路的原理框图

Fig. 2 Block diagram of the capacitance detection circuit

图 2 中电容-电压变换电路仍采用图 1 所示的比例运放电路,以消除长线影响。此时,左侧极板为激励电极;右侧极板为检测电极。对电路进行分析可知:

$$U_0 = -\frac{C_2}{C_1} \cdot U_s \quad (1)$$

$$C_1 = -\frac{U_s}{U_0} \cdot C_2 \quad (2)$$

由于 U_s, C_2 已知,因此可根据测得的 U_0 计算出 C_1 。

2 硬件设计

设计的测试仪表分为三个模块:电容检测模拟电路模块、微处理器数字电路模块和电源模块。待测传感器的电容值先经过电容检测电路,在模拟电路中对此信号进行 C-V 变换、精密检波、滤波等处理后输出直流电压信号,然后进入单片机内部的 ADC 转化成数字信号,再由单片机进行数字信号的处理,最后由单片机控制液晶显示器显示电容值。系统的结构框图如图 3 所示。

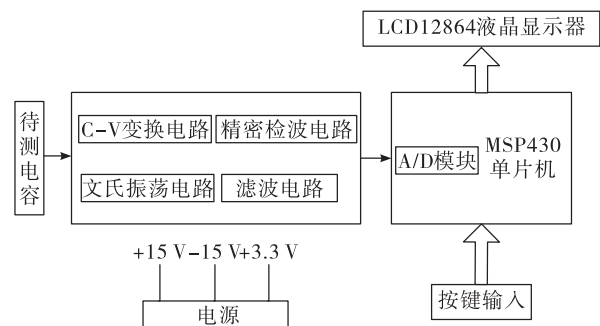


图 3 便携式微小电容测试仪系统结构框图

Fig. 3 System block diagram of portable miniature capacitance tester

2.1 电容检测电路

电容检测电路中的放大器均选用 OPA277^[7-8],放大电路的增益通过设计的电位器进行调节,接待测电容的一端接文氏振荡电路,另一端依次为C-V变换、绝对值检波、滤波、有效值校正电路,相比使用 DDS 器件产生正弦激励信号,该检测电路具有电路结构简单、幅度稳定及调节灵活的特点^[9]。电路中多处使用电位器的目的是为了进行精确调节,特别是文氏振荡电路中,若使用固定阻值的电阻取代电位器,由于电阻阻值的精度问题,很难保证两个电阻的阻值完全相同,会使起振波形失真。设计的电容检测电路能够测量 10 ~ 9 999 pF 范围内的微小电容,精度可达 1 pF。电容检测电路为模拟电路,设计时模拟地要与数字地分开,最后通过一个 0 Ω 的电阻连接。

2.2 数字电路部分

数字电路部分的核心是微处理器,选用自带 A/D 转换器的电压输入型微处理器 MSP430,该系列微处理器是一种 16 位超低功耗的混合信号处理器,其工作电压可低至 1.8 V,在待机模式下的功耗仅为 1.1 μ A,非常适用于便携式仪表^[10-11]。设计中综合考虑是否具有 FLASH 存储器和 A/D 转换功能等因素,选择 MSP430F449 作为系统的控制单元,其内部自带 12 位的 A/D 转换器,拥有 60KB + 256B 的 Flash Memory。显示模块选用全点阵液晶显示器 LCD12864,可通过字模提取软件显示汉字。

2.3 电源系统模块

系统需要 +15 V, -15 V 以及 +3.3 V 的电源来分别给模拟电路(电容检测电路)和数字电路(MSP430F449、LCD12864、外部存储器)供电,可以使用一节 9 V 电池作为系统的电源,9 V 电压经过 LM317 稳压芯片得到 5 V,再分别经过 A0515S-3W 和 AMS1117-3.3 得到 ± 15 V 和 3.3 V 的电压,其输入输出框图如图 4 所示。另外本设计还配备了 Micro-USB 接口,可外接充电宝为系统供电。由于模拟电路功耗较大,需选用 A0515S 电源模块的 3 W 型号才能保证该模块不会出现过热的情况。

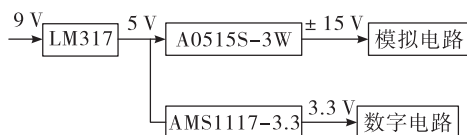


图4 电源输入输出框图

Fig. 4 Power input and output block diagram

3 软件设计

软件开发环境使用 IAR 公司的 Embedded Workbench IDE,系统中单片机的任务是扫描按键,然后根据扫描结果控制 A/D 采集电容检测电路输出的电压值,再将该电压值换算成对应的电容值,最后控制液晶显示器显示该电容值。所设计的软件应能满足硬件方面提出的要求,根据前面的任务要求,软件设计包含以下几项工作:

- 1)初始化。包括各输入输出端口的初始化、所需变量的定义以及设置寄存器的初始值;
- 2)按键扫描子程序。即用 ADC 的一个通道识别按键的不同状态,然后设置状态标志;
- 3)测量子程序。启动 AD 转换器,在 ADC 中断向量中对转换数据进行提取,计算 32 次转换结果的算术平均值并保存;
- 4)显示子程序。将电容值通过 LCD12864 显示出来,根据校准系数计算实际电容值,然后按位提取并逐一显示成 4 位数字,最大可显示 9 999 pF。系统的主程序流程如图 5 所示。

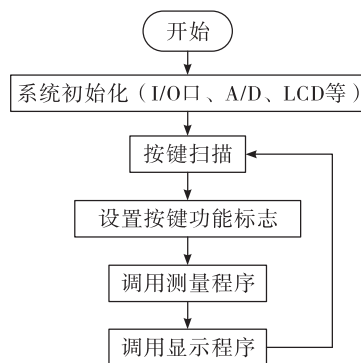


图5 主程序流程图

Fig. 5 Main program flow chart

4 系统调试

调试包括硬件电路调试和软件功能调试。先进行硬件电路的调试再进行微处理器软件功能的调试。硬件电路调试主要是调试电容检测电路输出所需的电压值,基本调试方法是通过外接标准电容,使其输出电压 1 mV 对应 1 pF;软件功能调试包括三方面:测试系统运行的可靠性;动态数据采集的输入、输出、实时显示;对测量数据滤波、计算电压值、数据线性修正等进行处理。

5 测量结果

用所设计的测量仪对 1 000 ~6 000 pF 范围的 6 个电容进行抽查检测。在基准电容 $C_2=5\,000\text{ pF}$ 时,测得输出电压与电容量的对应曲线如图 6 所示。

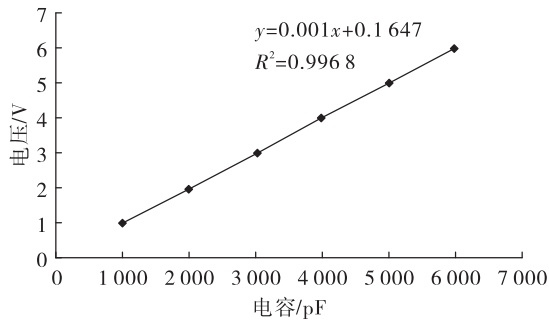


图 6 输出电压与电容量的对应曲线图
Fig. 6 Output voltage and capacitance curve

实验结果经回归分析,判定系数 R^2 为 0.996 8 (R 为相关系数),趋势线估计值与实际数据拟合程度较好。

为了确定测量的准确度以及三端测量法测量带长线缆的电容式传感器的实际效果,用 1 000 ~6 000 pF 范围的 6 个标称电容进行抽检,具体方法为用美国 Andeen Hagerling 公司生产的高精度电容电桥 AH2500A 测量标称电容,然后用手持式测试仪测量连接长线缆的标称电容,两组数据进行对比,结果如表 1 所示。

表 1 电容测量结果对比

Tab. 1 Comparison of capacitance measurement results

AH2500A 标定值/pF	测试仪测量 平均值(5 次)/pF	最大相对 偏差/%
1 005. 42	1 009	0. 51
2 008. 73	2 005	0. 36
3 002. 37	3 006	0. 62
4 007. 26	4 007	0. 20
5 003. 62	5 008	0. 73
5 999. 66	6 002	0. 46

从表 1 中可见,在 1 000 ~6 000 pF 范围内的 6 个标称电容,测试仪的测量误差不超过 1%。

6 结束语

笔者设计的手持式电容测试仪,以现有的电容传感器检测电路的成熟技术为基础,配以 MSP430 单片机作为测量仪器的主控制器,设计出具有 12 位分辨率、LCD 显示且具有三端测量功能的测量系统,它将计算机技术与检测技术结合在一起,实现了测量过程的智能化。经实际运行检验,通过采用微处理器进行数字化修正处理可以进一步提高电容测试仪的测量精度,该仪器不仅可测量 10 ~9 999 pF 范围内的微小电容,还可用于测量带有传输线缆的电容式传感器,如火箭发动机试验台贮箱内电容式液位计的测量。另外,根据调研市面上的手持式电容测试仪都是用两端法测量,而本装置采用的是三端测量法,因此具有更高的测量精度和准确度。

参考文献:

[1] 苏世熙,曾国强,喻明福,等. 一种微小电容测量仪的设计与实现[J]. 自动化与仪表,2015(1):46-52.

[2] 尹韬,杨海钢. MEMS 高精度电容读出电路的单芯片集成研究[J]. 电子器件,2007,30(4):22-26.

[3] 邱桂苹,于晓洋,陈德运. 微小电容测量电路[J]. 黑龙江电力,2006,28(5):362-366.

[4] 白国花. 电容传感器测量电路的研究与应用[D]. 太原:中北大学,2005.

[5] 段文浩,张佳,王虹玥. 数字式低温液位测量系统[J]. 火箭推进,2017,43(3):79-84.

DUAN Wenhao, ZHANG Jia, WANG Hongyue. Digital measurement system for cryogenic liquid level[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017,43(3):79-84.

[6] 杨天麒. 基于电容测量的液位检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2012.

[7] [日]冈村迪夫. OP 放大电路设计[M]. 北京:科学出版社,2004.

[8] [日]松井邦彦. OP 放大器应用技巧 100 例[M]. 北京:北京东方科龙图文有限公司,2005.

[9] 张少谦,马辰,李恩全,等. 一种基于 DDS 与单片机的自动电容测量系统设计[J]. 科学技术与工程,2010,10(25):21-24.

[10] 沈建华,杨艳琴. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机实践与系统设计[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[11] 秦龙. MSP430 单片机常用模块与综合系统实例精讲[M]. 北京:电子工业出版社,2007.

(编辑:马 杰)