

# 微小电容检测系统的设计及应用

侯亚宾 卜雄洙 孙斌

(南京理工大学机械工程学院测试计量技术及仪器系 南京 210094)

**摘要:** 针对在微小电容的检测中,传统模拟电路存在设计复杂,电容测量范围小等诸多局限性这一问题,设计了一种微小电容检测系统。该系统硬件主要由电容测量芯片 Pcap01、单片机 STM32F103C8T6 最小系统、供电电路以及 LCD 液晶显示屏构成。系统软件包括下位机的 C 程序,实现了电容数据采集、Pcap01-AD 与单片机之间的通信以及数据转换。实验结果表明,该系统结构简单,精度高,误差小,稳定性好,抗干扰能力强。能方便的应用于需要微小电容检测的场合,如电容式液位传感器等。

**关键词:** 微小电容;Pcap01;STM32F103C8T6;电容式液位传感器

**中图分类号:** TP212 TP216 TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.403

## Design and application of micro capacitance detection system

Hou Yabin Bu Xiongzhu Sun Bin

(Department of Technology of Measurement and Instrument, School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In the micro capacitance detection, the traditional analog circuits exist many limitations, such as the complex design, small capacitance measurement range. To solve these problems, a micro capacitance detection system was designed. This system consists of capacitance measuring chip Pcap01, the STM32F103C8T6 minimum system, the power supply circuit and the LCD display. The software of the system, including the C program of lower computer, realizes the function of collecting the capacitance data, communicating between Pcap01-AD and the MCU and converse the data. Experimental results show that the system has simple structure, high precision, small error, good stability, and strong anti-interference ability. It can be easily applied to the situations that require micro capacitive sensing, such as capacitive level sensors, etc.

**Keywords:** micro capacitance; Pcap01; STM32F103C8T6; capacitive level sensor

### 1 引言

电容式传感器是把被测量转换为电容量变化的一种参量型传感器。电容传感器具有尺寸小、低功耗、高精度、分辨率高、动态响应快、抗干扰能力强、能在恶劣环境下工作等优点,广泛应用于压力、物位、位移等各种检测中<sup>[1]</sup>。其中物位的测量包括物料、液体等,可用电容式传感器,通过把电容的变化量转化为高度的变化量来获取物位信息。比如用于测量液体高度的电容式液位传感器就是应用了这种测量原理。

对于电容检测,尤其是微小电容的检测,传统的

电路方式有其无法克服的局限性。复杂的模拟电路设计,难以扩展的电容测量范围,都会给开发带来很大阻力<sup>[2-4]</sup>。

针对传统电容检测电路的这些问题,国外已开发出多款专业的微电容检测芯片,如 CAV444、AD7746 和 Pcap01 等。由于生产工艺和技术原理上的不同,有些芯片在性能上还存在很大差异和缺点。例如:CAV444 测量范围较广,能达到 19~2 200 pF,线性度好。但相对于有些电容传感器几 pF 的电容量,19 pF 的最小测量值仍然太大,且输出模拟信号需要后续使用 A/D 转换电路,增加电路设计量;AD7746 具有很低的测量下限,能够输出数

收稿日期:2015-07

字量,但测量范围只有 $4\sim 21$  fF,若扩容势必会引入更多寄生电容,对精度造成影响<sup>[5-6]</sup>。

通过对几种芯片的对比分析,选用德国 ACAM 公司出品的电容数字转换芯片 Pcap01 来完成测量系统的设计。

## 2 Pcap01 工作原理

Pcap01 是一款专注于电容测量的芯片,芯片内部具有应用哈佛结构的 DSP 处理单元,能够把检测到的电容值自动转换为数字信号输出。可同时测量多组电容(接地模式下 8 组,漂移模式下 4 组)。通过设置 Block 测量,可提供对内部寄生电容和比较器延迟的内部补偿测量,对漂移模式额外提供外部补偿测量。芯片内部集成一个铝电阻和一个多晶硅电阻用于进行温度测量,也可外接温度传感器电阻和参考电阻,片内片外提供多达 11 种组合方式。对于通信接口,提供了 4 线制 SPI 串行通信,兼容 IIC 内部集成电路接口,也可通过 GPIO 口进行 PDM/PWM 输出。

芯片转换器前端基于 ACAM 公司专利的 PICO-CAP<sup>®</sup> 测量原理。即被测传感器的电容和参考电容被连接到同一个内部的放电电阻,构成了一个低通滤波。电容被充电到电源电压,然后通过电阻放电,放电到一个可控制阈值电压水平的会被芯片内部极高精度的时间数字转换器记录下来。电容充放电时序周期如图 1 所示。

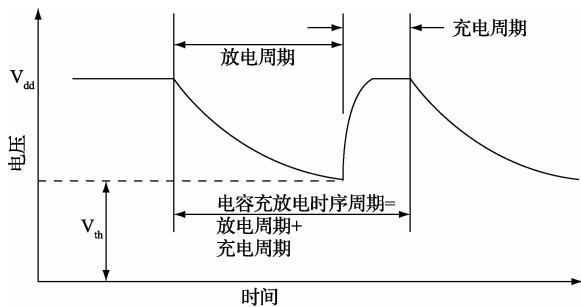


图 1 电容充放电时序周期

这种充放电的测量原理提供了最小可以到  $2\ \mu\text{s}$  范围的高精度时间转换。

测量结果用式(1)进行推导。放电时间与传感器的电容值和参考电容的值成比率关系:

$$\frac{\tau_N}{\tau_{ref}} = \frac{C_N}{C_{ref}} \quad (1)$$

式中: $\tau_N$  为传感器电容的放电时间, $\tau_{ref}$  为参考电容的放电时间, $C_N$  为传感器电容, $C_{ref}$  为参考电容。

通过记录电容充放电的时间比值,得到传感器电容和参考电容的比率。由于测量周期可以低至  $\mu\text{s}$  级,可以看做测量周期内传感器的电容值没有改变,大大提高了测量的准确性。

芯片的测量范围可以从几 fF 到几百 nF,能满足大部分电容范围的需求。通过简单的配置,可以提供最低至几微安的超低功耗测量、精度达到 21 位有效位的高性能测量和每秒钟最高达 50 万次的快速测量,做到高精度、低功耗和快速测量的兼顾<sup>[7]</sup>。

## 3 总体设计

检测系统主要分为两部分:硬件部分和软件部分。

### 1) 硬件部分

单片机 STM32F103C8T6 通过 IIC 通信协议和 Pcap01 建立通信以及各部分的外围基础电路<sup>[8]</sup>。

### 2) 软件部分

单片机的下位机 C 程序,包括通信协议,对芯片内部 RAM 和寄存器进行配置操作,完成数据测量和处理,显示结果到 LCD 液晶显示屏上等。

系统原理如图 2 所示,其中供电电路实现对系统的供电及电压转换。

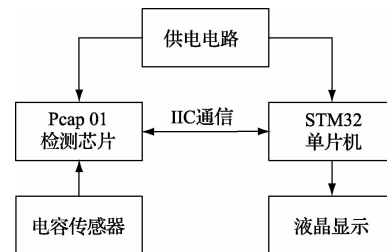


图 2 系统原理

## 4 系统硬件设计

系统的硬件主要包括微小电容测量电路、单片机处理电路。而微小电容的测量电路是整个系统中最关键的一部分。

### 4.1 微小电容测量电路设计

本部分的设计主要由 Pcap01 芯片及其外围电路完成。

芯片采用  $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ , QFN32 的封装,具有高度集成化和微小体积的优势。芯片的输出为 24 bit 的数字信号,无需再进行外部的 A/D 转换,可直接把数据传输给后续的单片机的处理。如图 3 所示为微小电容测量电路的硬件设计原理。

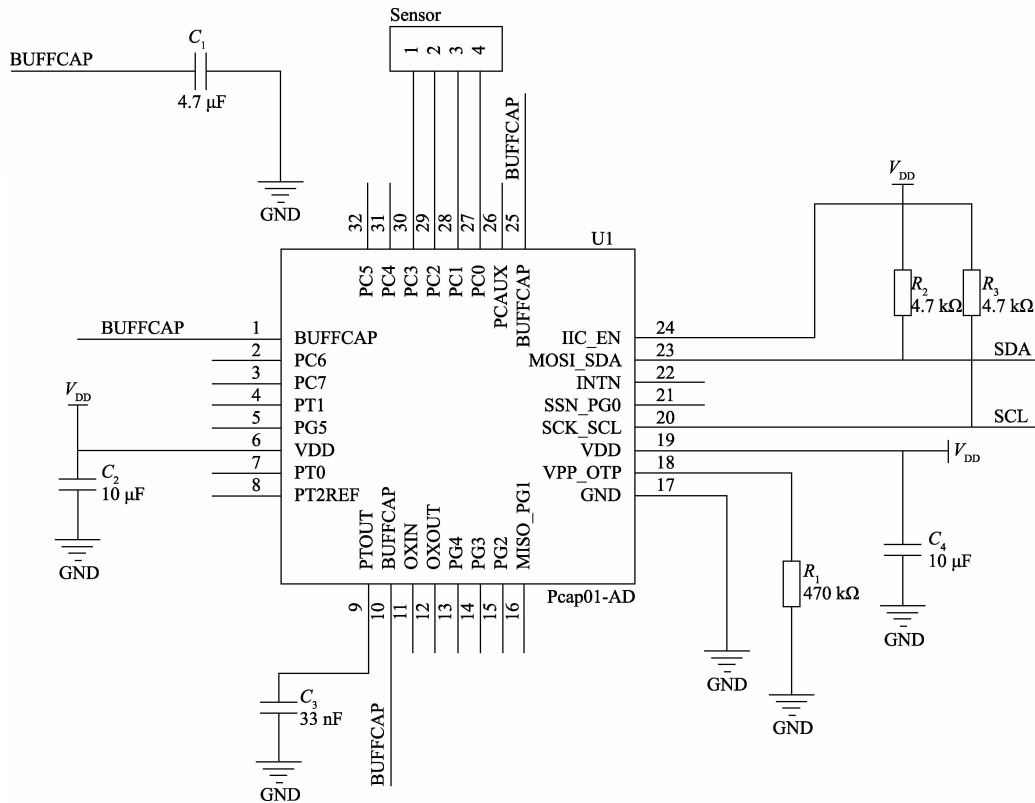


图3 微小电容测量电路设计

如图3所示,芯片采用单一传感器漂移模式,可接1个参考电容和3个传感器。要求各电容输入端口的走线尽量短,可考虑采用驱动电缆技术抑制寄生电容<sup>[9]</sup>。接地电容也有利于降低噪声干扰。通信方式选择为接线方便的IIC协议通信。电路设计比较简单,只需少量的外围器件。

#### 4.2 单片机处理电路

该部分电路主要由单片机STM32F103C8T6的最小系统组成,外围电路有供电电路、时钟电路、复位电路以及IIC接口电路,LCD电路<sup>[10]</sup>。其中供电电路由AMS1117芯片把USB接口的5V电压转换为系统需要的3.3V电压。

### 5 系统软件设计

系统软件设计主要是下位机C语言程序设计。

下位机程序由C语言编程,主要包括STM32单片机的初始化、测量芯片Pcap01的初始化、通信、测量与数据传输等功能。

芯片Pcap01初始化需要通信测试并向SRAM下载固件,此固件由芯片厂商提供,最后按照设计要求配置寄存器。

完成STM32和芯片的初始化后,发送开始测量命令,采集数据并传输。

### 6 实验结果及应用

完成以上设计后,制作电路板进行实验。选取两个均为47 pF的贴片陶瓷电容分别作为参考电容 $C_0$ 和

测量电容 $C_1$ 。Pcap01的寄存器结果是相对于参考电容的比率输出 $C_1/C_0$ ,所以需要式(2)对读取的寄存器值进行转换:

$$C = \frac{C_{com}}{2^{21}} \times C_{ref} \quad (2)$$

式中: $C$ 为转换后的测量结果, $C_{com}$ 为Pcap01的测量比率转换后的10进制数, $C_{ref}$ 为参考电容值的大小。

实验结果如表1所示。

表1 Pcap01 电容测量数据

序号	寄存器值	电容值/pF	序号	寄存器值	电容值/pF
1	201EB7	47.176	6	201F13	47.179
2	201ECA	47.177	7	201EDA	47.177
3	201EE1	47.177	8	201D86	47.170
4	201FB9	47.182	9	201F83	47.180
5	201ED4	47.177	10	201F49	47.179

求其标准差为 $\sigma=3.232$  fF。

使用AD7746扩容进行对比实验,实验结果如表2所示。

表2 AD7746 电容测量数据

序号	电容值/pF	序号	电容值/pF
1	47.527	3	47.543
2	47.556	4	47.539

实验结果表明,AD7746扩容后会对测量精度带来较大影响,而使用Pcap01的系统精度高、稳定性好。

基于上述特点,该系统可以应用于电容式液位传感器。传感器示意如图4所示。

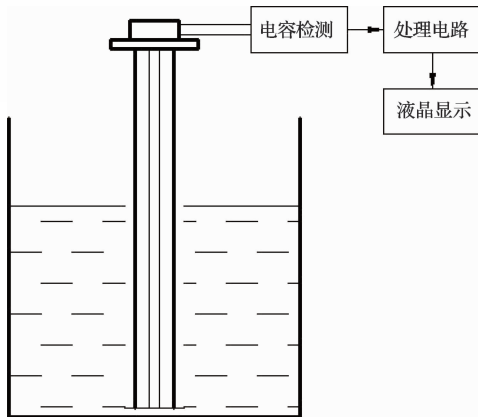


图4 电容式液位传感器

传感器两个极板是相互绝缘的两个同心金属圆柱,内外电极的直径分别为 $d$ 和 $D$ ;极板间介质为待测液体和空气,介电常数分别为 $\epsilon$ 和 $\epsilon_0$ ;  $H$ 为液面的高度, $L$ 为总高度。

根据电容计算公式,传感器总电容为:

$$C = \frac{2\pi(\epsilon - \epsilon_0)H}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(D/d)} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,传感器电容与液面的高度成线性正比关系,因此可以通过测量传感器的电容计算出当前的液位高度<sup>[11]</sup>。

制作同心圆柱形电容器,连接到检测系统进行液位测量实验。测量数据如表3所示。

表3 电容式液位传感器测量数据

液位高度/m	电容值/pF	液位高度/m	电容值/pF
0	80.712	0.16	118.192
0.04	90.187	0.20	127.415
0.08	99.486	0.24	136.690
0.12	109.115	0.28	146.512

对以上数据进行最小二乘拟合,得到的曲线如图5所示。

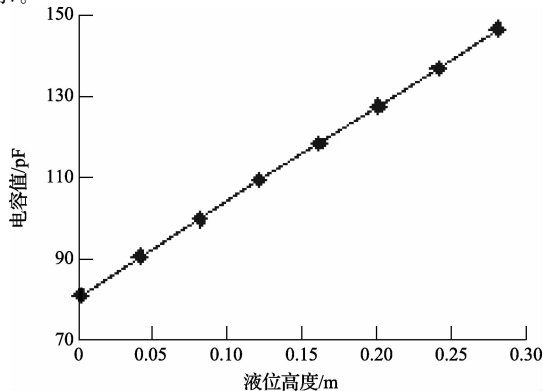


图5 拟合曲线

得到电容值和液位高度之间的拟合方程如式(4)所示:

$$C_H = 80.79 + 233.92H \text{ (pF)} \quad (4)$$

由线性度的定义及公式可以得出,传感器的线性度 $\delta=0.42\%$ 。

## 7 结 论

本文以电容数字转换芯片Pcap01为核心,设计了一种微小电容检测系统。该系统电路结构简单,可同时检测多路电容,检测效率高。实验结果表明,系统精度高、误差小、稳定性好,适合检测微小电容量。配合不同的电容器,可应用于多种场合,如测量汽车油箱的油位等。

## 参 考 文 献

- [1] 孙一心,钟莹,王向鸿,等. 柔性电容式触觉传感器的研究与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1394-1400.
- [2] 张宇鹏,徐钰蕾,王昱棠. 高精度电容式角位移传感器测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 147-150.
- [3] 朱宵波,苑伟政,任森. 一种电容式传感器数字化通用检测接口设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(1): 62-65.
- [4] 津德财,邵富群,郭志恒. 高压法微小电容检测[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1448-1451.
- [5] 邓丽萍,桑胜波,张文栋,等. 基于Pcap01芯片的高精度微小电容检测系统设计[J]. 传感技术学报, 2013, 26(8): 1045-1049.
- [6] 陈颖光,肖丹. 基于平行板电容传感器的地沟油检测研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4): 84-86.
- [7] 德国 acam 公司. PICOCAP 数据手册 DB\_PCap01-0301\_eVO. 4[EB/OL]. <http://www.acam.de>, 2011-5-13.
- [8] 王能,严发宝,张京,等. 一种基于I<sup>2</sup>C接口传感器的高速板卡状态监控系统[J]. 电子测量技术, 2013, 36(3): 94-97.
- [9] 刘秉安. 电容式传感器寄生电容的抑制[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(3): 46-49.
- [10] 郭书军,王玉花. ARM Cortex-M3 系统设计与实现——STM32 基础篇[M]. 北京:电子工业出版社, 2014:94-103.
- [11] 王芸,张国雄,樊玉铭. 基于运算法的电容式液位传感器的设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(3): 122-124.

## 作 者 简 介

侯亚宾,1990年出生,在读硕士研究生。主要研究方向为现代传感技术及仪器。

E-mail:hyb0005426@126.com