



电容型人体接近感知系统的研究与实现

杨光义¹, 支叶², 劳崇哲¹, 陈小桥¹

(1. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 针对广泛应用的人机交互设备, 以 STM32 为控制核心, 设计并实现了一种电容型人体接近探测系统, 能够感知人体有无并用于系统自动唤醒。系统以电容型接近传感器对接近的人体敏感特性为前提, 采用电容数字转换器 FDC1004 作为测量器件, 辅以环境温度补偿和光线感应模块, 具有电路简单、测量精度高及抗干扰能力强等特点。实验结果表明, 除能够感知 0~30 cm 范围内人体有无外, 还能够精确测量 0~5 cm 范围内的人体接近距离, 并在 TFT-LCD 液晶屏上显示。针对不同的应用场合, 灵活调整传感器尺寸, 可以实现不同距离的感知和测量。

关键词: 自动唤醒; 电容数字转换; 位移传感器; 动态阈值

中图分类号: TN761.2; G 642.423

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20180555

Research and Realization of Capacitive Human Body Proximity Perceptual System

YANG Guangyi¹, ZHI Ye², LAO Chongzhe¹, CHEN Xiaoqiao¹

(1. Electronic Information College, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aiming at the widely used human-computer interaction equipment, with STM32 as the control core, a capacitive human body proximity detection system is designed and implemented, which can sense the presence of human body and be used for automatic wake-up of the system. Based on the premise that the capacitive proximity sensor is sensitive to the approaching human body, the system uses a capacitive-to-digital converter FDC1004 as a measurement device, supplemented by ambient temperature compensation and a light sensing module. It has the characteristics of simple circuits, high measurement accuracy, and strong anti-interference ability. The experimental results show that in addition to being able to sense the presence of the human body in the range of 0~30 cm, it is also possible for the system to accurately measure the human body proximity distance in the range of 0~5 cm, and display the measurements on the TFT-LCD screen. The size of the sensor is adjustable so that the system can detect and measure different distances.

Key words: automatic wake-up; capacitance digital conversion; displacement sensor; dynamic threshold

人机交互系统已被广泛应用在人们的日常生活中, 如各种类型的充值机、贩卖机、柜员机、查询机等, 但由于缺少合适的接近唤醒技术, 设备全天开机或长期执行特定程序, 浪费大量电力资源。在能源问题越来越突出的今天, 设计一种简单高效的人体接近探测系统, 对于节能环保, 提高资源利用效率, 有着迫切的现实意义^[1]。

为此, 本文采用电容型接近传感器, 设计了一套人体接近感知系统, 能够准确感知有无

体, 实现系统自动唤醒或待机。系统基于非接触式电容耦合技术^[2], 采用模块化思想, 不仅性能稳定, 频率响应快, 而且使用寿命长, 抗干扰能力强, 具有灵敏度高、功耗低、体积小和可移植性强等特点, 可广泛应用于生活中的电子系统, 有效减少能源消耗。

1 系统组成

基于 STM32 的电容型人体接近感知系统采用

收稿日期: 2018-12-06; 修回日期: 2019-06-22

基金项目: 武汉大学 2018—2019 学年实验教学中心开放实验项目(WHU-2018-XYKF-05); 湖北省教学改革建设项目(2017JG109)。

作者简介: 杨光义(1983-), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事高频电路和图像处理方面的研究。

模块化设计, 主要包括主控模块、传感器模块、电容/数字转换模块、环境光线检测模块和环境温度检测模块。系统框图如图 1 所示。

传感器模块感知外界信号, 经过电容/数字 (capacitor to digital, C/D) 转换模块后变为数字信号, 通过 I²C 总线送至主控模块处理。单片机 STM32F407 实时测量和计算人体距离, 并根据动态阈值控制 TFT-LCD 液晶屏的背光亮度。另外, 温度检测模块用于感应环境温度, 使系统可以根据环境温度对所测电容值进行补偿。光线检测模块用于感应环境光线, 使系统可以根据周围光照强度调整屏幕亮度, 节约能耗的同时, 提供良好的用户体验。

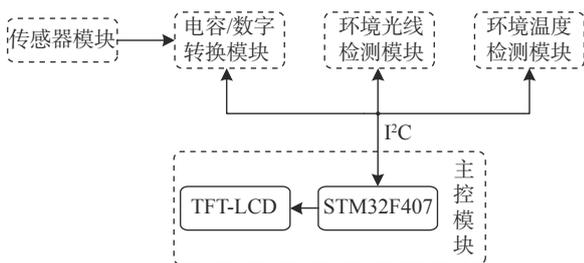


图 1 电容型人体接近探测系统框图

2 系统硬件设计

结合系统框图 1, 系统硬件设计依次按照主控

模块、传感器模块、电容/数字转换模块、环境光线检测模块和环境温度检测模块展开。

2.1 主控模块

主控模块采用意法半导体公司 (ST) 生产的单片机 STM32F407。它是基于 Cortex-M4 内核的 32 位高性能微控制器, 集成了单周期 DSP 指令和硬件 FPU (floating point unit, 浮点单元), 可以进行一些复杂的计算和控制。其片内资源丰富, 具有 1 MB 的片内 Flash、192 KB 的片内 SRAM、1 个 FSMC (flexible static memory controller, 可变静态存储控制器) 接口和 112 个通用输入/输出 (I/O) 接口。主频高达 168 MHz, ART (adaptive real-time memory accelerator, 自适应实时存储器加速器) 技术使得程序零等待执行, 提升了程序执行效率^[3]。

系统显示屏为 4.3 寸 TFT-LCD 液晶屏, 分辨率为 800×470, 自带触摸屏, 采用工业级驱动芯片 ILI9341。为使显示速度更快, 设计采用 16 位接口模式, 由 FSMC 数据接口连接控制。FSMC 采用 32 位多重 AHB (advanced high performance bus, 高级高性能总线) 矩阵, 刷屏速度可达 3 300 万像素/秒^[4]。屏幕背光亮度通过单片机 STM32F407 的 I/O 引脚 PB15 控制调节。单片机 STM32F407 与 TFT-LCD 液晶屏之间的连接如图 2 所示, 受篇幅限制, 电源、JTAG、时钟和复位等辅助电路略。

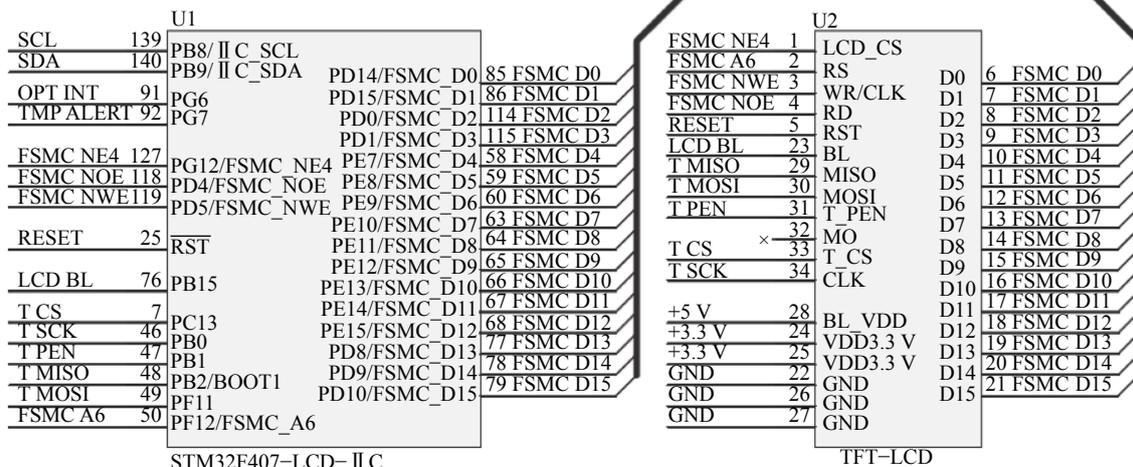


图 2 主控模块电路图

2.2 传感器模块

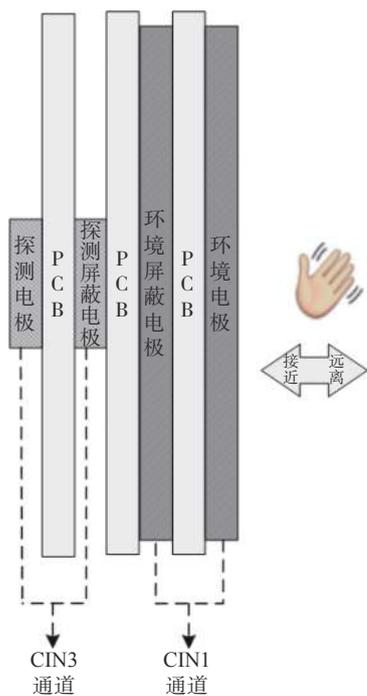
传感器电极是传感器模块的关键部分, 是系统进行非接触感知的重点和难点。传感器电极感

应的距离和灵敏度受传感器堆栈设计、电极表面积、最接近的共地源以及来自内部和外部的噪声等影响^[5-6]。

如图 3 所示，传感器模块包括 4 种电极：探测电极、探测屏蔽电极、环境电极和环境屏蔽电极。为了减少电磁干扰的影响并且使传感器的测量集中在一个方向上，同时最小化由 PCB(printed circuit board, 印制电路板)膨胀或收缩而对测量电容的影响，传感器探测电极一般设计有相同几何形状的屏蔽层。传感器背面设计一个环境电极，同样带有屏蔽层。屏蔽电极的增大能降低电路干扰，但会减小探测距离。而探测电极面积的增大会增大探测距离，但会降低装置的便携性^[7-8]。



(a) 传感器面板示意图



(b) 传感器电极结构示意图

图 3 传感器设计示意图

不同于传统意义上的平板电容器，单极板电容器由于电场特性复杂，目前还没有学者提出有效的数学模型。美国德州仪器公司(TI)基于长期的实验积累，得出传感器探测距离 D 与探测电极面积 S 之间的关系如表 1 所示^[9]。根据表 1，绘制探测距离 D 随电极面积 S 变化曲线如图 4 所示，

可见传感器感应区域的尺寸与有效的感应范围成正相关。

实际应用中，传感器一般采用 PCB 印刷矩形框形状，环境电极及其屏蔽电极位于 PCB 的对称中心，探测电极及其屏蔽电极与环境电极及其屏蔽电极同轴分布。连接电容/数字转换模块与电极的同轴线内芯为输入、外部为屏蔽层，减少连接造成的寄生电容干扰。

表 1 探测距离与电极面积关系表

序号	电极面积 S/cm^2	探测距离 D/cm
1	0.25	15
2	1	17
3	4	19
4	9	22
5	16	25
6	25	28
7	36	31
8	49	33
9	64	37
10	81	39
11	169	50

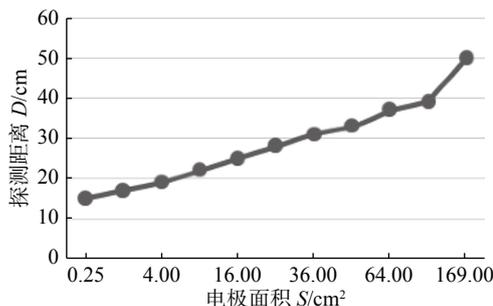


图 4 探测距离随电极面积变化曲线图

综合设计成本、装置体积与系统效果等因素，本文设计的探测电极为外框 $12\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 、内框 $10\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的矩形框，环境电极为 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 的矩形区域。因此，电极面积为：

$$S = 12 \times 8 - 10 \times 6 = 36\text{ cm}^2 \quad (1)$$

2.3 电容/数字转换模块

电容/数字转换模块采用 TI 生产的 4 通道电容数字转换器 FDC1004，通过 I²C 接口与单片机 STM32F407 通信，读写寄存器配置和存取数据，实现接近传感器上的电容测量。电容数字转换器

FDC1004 采用 10 引脚 WSON 小尺寸封装, 2.7~5.25 V 单电源供电, 分辨率达 0.5 fF, 具有分辨率高、功耗低、空间占用小等优点^[10]。

电容数字转换器 FDC1004 有 4 个电容检测输入通道, 两个信号屏蔽通道, 提供单端和差分两种测量模式。单端测量模式下, 每个通道的满量程范围均为 ± 15 pF, 同时芯片内置的偏置电容可以抵消最大 100 pF 的电容, 理论上可以达到对最大 115 pF 的电容的测量。差分测量模式下, 由于电容数字转换器 FDC1004 包含用于传感器屏蔽的屏

蔽驱动器, 屏蔽激励与输入激励完全一致, 因此输入与屏蔽之间的电容并不会对测量结果产生影响, 能够让测量独立于环境状况之外, 从而减少 EMI 等环境干扰, 聚焦传感器的感测方向^[11]。

系统采用差分测量模式, 具体电路如图 5 所示。探测电极和探测屏蔽电极由 CIN1 通道输入, 环境电极和环境屏蔽电极由 CIN3 输入。环境电极和探测电极面临的环境条件完全相同, 而电容数字转换器 FDC1004 测量的是两者之间的差异, 因此有效地消除了环境变化的影响。

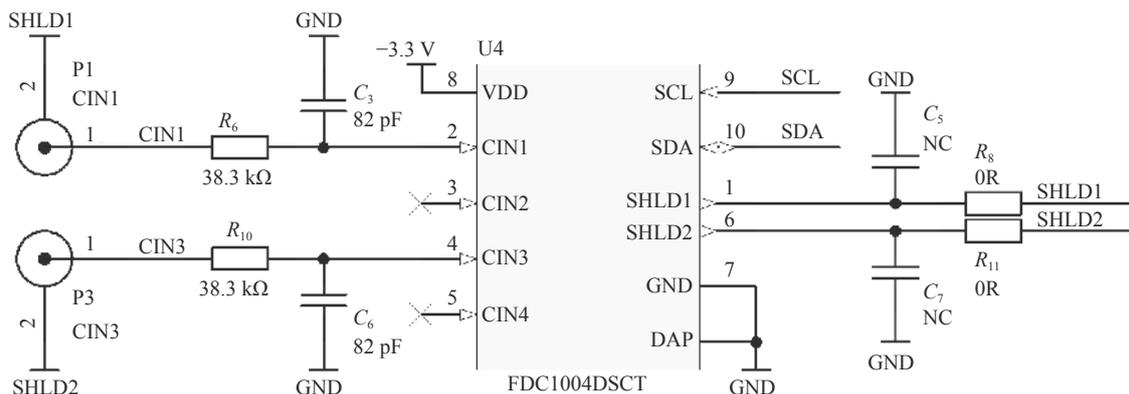


图 5 电容/数字转换模块电路图

电路设计过程中尤其需要注意的是, 电容/数字转换模块应尽可能靠近传感器电极, 使测量更准确。各电极和电容数字转换器 FDC1004 输入引脚以及地线之间的返回路径应尽可能短。同时, 将 PCB 走线与输入引脚屏蔽开来, 并将屏蔽体连接到电容数字转换器 FDC1004 的屏蔽引脚。

2.4 环境光线检测模块

为提高系统适用性, 在极端光线条件下也易于操作, 光线检测模块采用环境光传感器 OPT3001, 测量可见光强度, 调节屏幕亮度, 使屏幕适于人眼观看, 并降低系统功耗。而且, 光传感器 OPT3001 具有低功耗和低电源电压特性, 可延长电池供电系统的寿命。

光传感器 OPT3001 能够如人眼般准确测量光强且不受其他光源影响, 兼具精密的频谱响应和较强的红外阻隔功能, 测量范围可达 0.01~83 000 lx, 内置满量程设置功能, 无须手动选择满量程范围, 既可连续测量也可单次触发^[12]。光传感器 OPT3001 通过 I²C 接口与单片机 STM32F407 通信,

具体电路如图 6 所示。

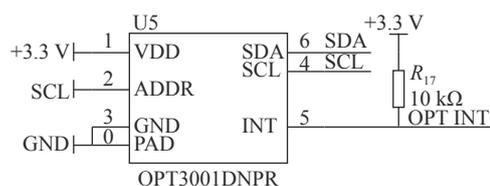


图 6 光线检测模块电路图

为提高测量准确度, 光线检测模块尽量置于系统最上层。使用过程中, 防止手或身体在屏幕唤醒时遮挡光传感器, 以免得到不正确的光强测量结果。

2.5 环境温度检测模块

环境电极和探测电极几何形状不同, 反映环境温度变化的能力也有差异, 随着温度升高, 两者测量值差距增大。由此引发电容基准值的漂移不容忽视。为了消除温度变化带来的影响, 系统设置了温度检测模块, 用于调节电容数字转换器 FDC1004 的测量增益, 使基准值稳定。温度检测模块采用温度传感器 TMP112, 通过 I²C

接口与单片机 STM32F407 通信，具体电路如图 7 所示。

温度传感器 TMP112 作为一款超低功耗温度传感芯片，每个温度数据为 12 位，最小分辨率 0.0625℃，测量范围-40~125℃，在 0~65℃ 时测量精度达到 0.5℃。采用 SOT563 小型封装，占用空间小。温度传感器 TMP112 还具有温度报警功能，当所处环境温度超过预设温度时，及时产生报警信号^[13]。

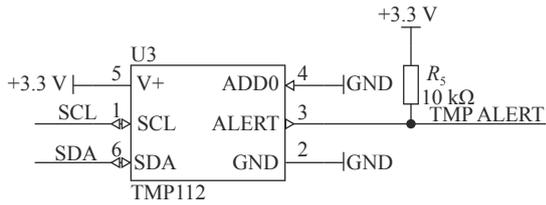


图 7 温度检测模块电路图

3 系统软件设计

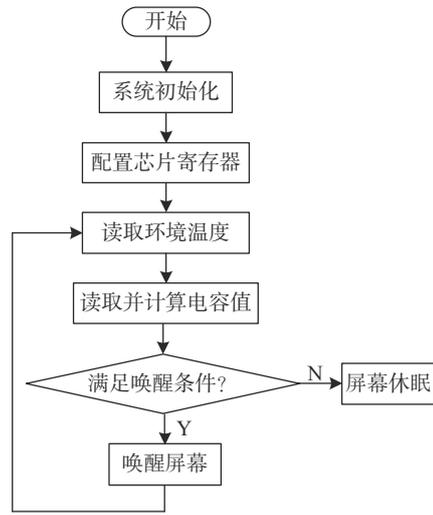
3.1 总体思路

系统软件部分主要完成电容/数字转换模块、光线检测模块和温度检测模块的数据读取、计算和 LCD 显示等功能。主程序流程图如图 8(a)所示，首先初始化系统，配置电容数字转换器 FDC1004、光传感器 OPT3001 和温度传感器 TMP112 的寄存器，使它们处于设定工作状态。然后在单片机 STM32F407 的控制下通过 I²C 读取照度、温度和电容值，当瞬时电容值超过动态阈值时，唤醒屏幕，开启一段时间 LCD 背光。如果瞬时电容持续超过动态阈值，则背光开启时间顺延。如果瞬时电容值持续小于动态阈值一段时间，则关闭 LCD 背光，使屏幕进入休眠状态。屏幕唤醒子程序流程图如图 8(b)所示，电容数字转换器 FDC1004 工作于差分模式，设置为 100 S/s 的采样率和连续测量模式。以多次差分测量得到的短时电容均值作为瞬时值来减少噪声，以多个短时平均值的均值作为动态阈值来避免环境变化造成基准值波动的影响。另外，系统软件可以根据环境光强调节 LCD 屏幕的背光亮度，环境光照强时，背光较亮，反之背光较暗。系统还可以根据事先得到的电容-温度曲线，补偿测得的电容值。

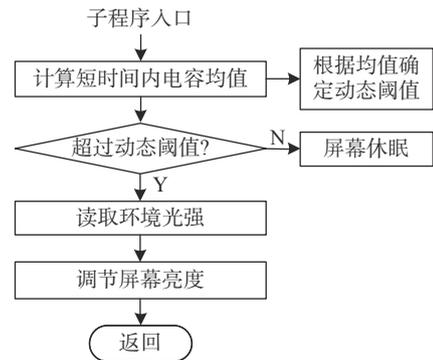
3.2 工作时序

I²C 是由数据线 SDA 和时钟线 SCL 构成的串

行总线，可用于发送和接收数据。在 SCL 串行时钟控制下，数据在 SDA 线上逐位传送^[14]。电容数字转换器 FDC1004、光传感器 OPT3001 和温度传感器 TMP112 均通过 I²C 总线与单片机 STM32F407 连接，为了防止地址冲突，系统 I²C 硬件地址分配如表 2 所示。



(a) 主程序流程图



(b) 屏幕唤醒子程序流程图

图 8 主程序流程图和屏幕唤醒子程序流程图

表 2 系统 I²C 地址分配表

序号	芯片	I ² C地址
1	FDC1004	01010000
2	TMP112	01001000
3	OPT3001	01000111

如图 9 所示，I²C 总线共有 3 种信号：开始信号、结束信号和应答信号。SCL 为高电平时，SDA 由高电平向低电平跳变，数据传送开始；SCL 为高电平时，SDA 由低电平向高电平跳变，数据传送结束；受控芯片接收到 8 位数据后，向主控芯片发出特定低电平脉冲，作为应答信号。主控芯片发送数据后，等待应答，再做出是否继

续传递信号的判断。若未收到应答信号, 则判断受控单元故障。工程应用中, 通常可以用两个通

用 I/O 口作为 SDA 和 SCL, 模拟 I²C 时序传输数据, 实现 I²C 总线同样的功能。

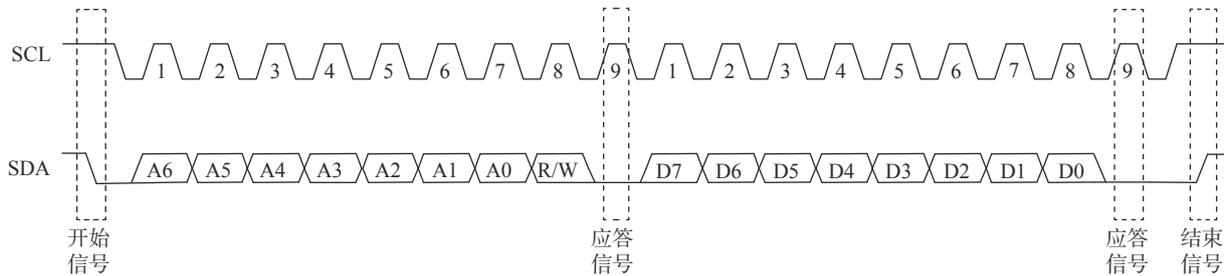


图 9 I²C 总线时序图

4 实验测试与分析

4.1 人体感知实验

为了验证系统的性能, 首先开展人体感知实验。分析表 1 和图 4 可知, 传感器电极面积 S 为 36 cm^2 , 因此理论上有效探测的距离为 31 cm 。

在实验室环境下 (23°C), 实验者缓慢接近传感器, 同时记录实验者与传感器之间的距离 L 和 TFT-LCD 上显示的电容值 C , 如表 3 所示。当距离 L 超过 30 cm 时, 电容值 C 没有明显变化, 因此没有记录在表 3 中。根据表 3, 绘制探测范围内的电容值 C -距离 L 关系曲线如图 10 所示。

表 3 电容值 C -距离 L 对应关系表

序号	距离 L/cm	电容值 C/pF	序号	距离 L/cm	电容值 C/pF
1	30	8.881	11	10	8.971
2	27	8.900	12	9	8.995
3	26	8.904	13	8	9.040
4	25	8.907	14	5	9.190
5	24	8.908	15	3	9.336
6	23	8.910	16	1	9.813
7	22	8.911	17	0.9	10.095
8	21	8.905	18	0.5	10.557
9	20	8.918	19	0.3	11.113
10	15	8.954	20	0.1	11.974

从图 10 可以看出, 人机交互时, 系统在 $0\sim 30 \text{ cm}$ 距离范围内能够感知人体有无, 满足设计预期。此外, 曲线在 $0\sim 5 \text{ cm}$ 距离范围内有较陡峭的斜率, 对图 10 的曲线进行回归分析, 拟合出实验者与传感器之间的距离公式。可以根据测得的电容

值和拟合公式, 反算出与该电容值对应的距离。超过 5 cm 时, 曲线斜率降低, 但仍有一定参考价值。针对具体的应用, 可以调整电极面积以满足探测距离的需求。

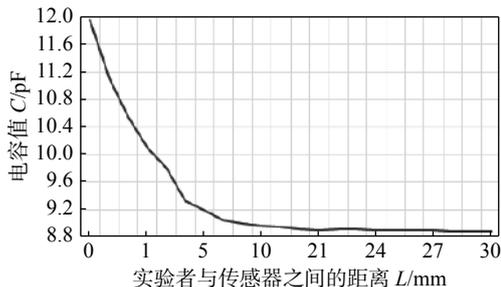


图 10 电容值 C -距离 L 关系曲线

4.2 环境温度实验

缓慢调整系统所处的环境温度, 同时记录环境温度和无人接近系统时 TFT-LCD 上显示的电容值。根据记录数据绘制环境温度 T -基准电容值 C_0 关系曲线如图 11 所示。将图 11 的线性关系加入单片机 STM32F407 程序中, 修正瞬时值与动态阈值的计算, 消除温度对系统的影响, 降低系统误判的可能性。

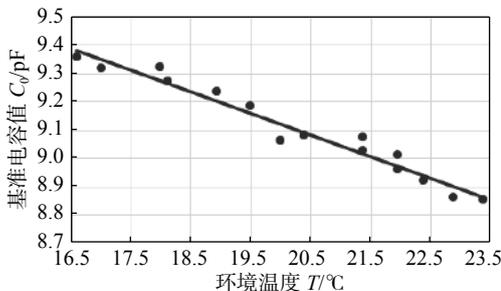


图 11 环境温度 T -基准电容值 C_0 关系曲线

5 结束语

本文设计了一套电容型人体接近感知系统,

给出了完整的系统框图和硬件设计原理图, 详细介绍了单极板电容器的设计思路和实现细节。实验结果表明, 系统在 0~30 cm 距离范围内能够探测有无人体, 还能够精确测量范围为 0~5 cm 的人体接近距离, 并在 TFT-LCD 上显示测量结果。系统采用模块化设计思想, 具有电路简单、测量精度高及抗干扰能力强等特点。在当前低碳环保的大背景下, 系统对单极板电容器的理论研究和工程实践均有一定的指导意义, 必将有很高的推广价值和广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 包建军. 煤矿井下装备接近探测方法研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(1): 1-4.
- [2] 史军刚, 李小平, 谢锴, 等. 非接触电容耦合式信号传输方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(4): 14-19.
- [3] 张旭, 元学广, 李世光, 等. 基于STM32电力数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(11): 90-93.
- [4] 汤莉莉, 黄伟. 基于STM32的FSMC接口驱动TFT彩屏设计[J]. 现代电子技术, 2013, 36(20): 139-141, 144.
- [5] DAVID W. Capacitive proximity sensing using the FDC1004[EB/OL]. [2015-04-12]. <http://www.ti.com/lit/an/snoa928a/snoa928a.pdf>.
- [6] Texas Instruments. FDC1004 EVM user's guide[EB/OL]. [2016-10]. <http://www.ti.com/lit/ug/snau163c/snau163c.pdf>.
- [7] LIU X, PENG K, CHEN Z, et al. A new capacitive displacement sensor with nanometer accuracy and long range[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2306-2316.
- [8] 刘焱, 王焯. 位移传感器的技术发展现状与发展趋势[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(6): 76-80, 101.
- [9] 徐冬平, 张鹏鹏, 孙诗裕. 基于FDC1004的电容式谷物水分检测仪的设计[J]. 农机化研究, 2016, 38(8): 173-178.
- [10] 李晓钰, 陈向东, 姚尧, 等. 复杂电极结构的单片式电容传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1541-1546.
- [11] Texas Instruments. Backlight and smart lighting control by ambient light and proximity sensor[EB/OL]. [2016-5]. <http://www.ti.com/lit/ug/tidub42b/tidub42b.pdf>.
- [12] Texas Instruments. OPT3001: Ambient light sensor application guide[EB/OL]. [2017-09-09]. <http://www.ti.com/lit/an/sbea002a/sbea002a.pdf>.
- [13] 刘会刚, 杨榕, 乔瑞秀, 等. TFT-LCD显示环境温度及紫外线强度的研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2012, 45(6): 41-45.
- [14] 李仙, 宋晓梅. I²C总线在移动智能终端领域中的应用[J]. 电子设计工程, 2013, 21(21): 114-116, 119.

编辑 张俊