

纸张计数显示装置

摘要：本设计实现的纸张计数显示装置，基于电容式传感芯片 FDC2214 和 Artix-7 系列 FPGA，可以对所放纸张进行精确计数。该装置由电容传感器电路模块、数据处理模块与显示模块组成。电容传感器电路模块采集电容感应极板的电容值，数据处理模块将接收的数据运用线性回归算法进行计算，从而判断纸张数量，最后将纸张数据通过 LCD 屏幕进行显示。该装置从开始测量到确定纸张具体数量的时间小于 5 秒，很好地完成了题目测量指标。

关键词：纸张计数；电容传感器；线性回归算法

一、 系统方案

1. 方案比较与选择

1.1 电容测量方案

方案一：利用 RC 网络充放电时间测量电容。使用电容数字转换芯片 PCap01，先将电容充电到电源电压，然后该电容通过电阻进行放电。当电容放电到一个可控制阈值电压的水平时，记录放电时间，进而计算出相应电容值。

方案二：利用 LC 网络谐振频率测量电容。使用电容测量芯片 FDC2214，将固定的电感与电容并联，测量不同电容值下的 LC 网络谐振频率，进而计算出电容值。

方案选择：方案一，PCap01 输出的数据为每帧 21 位。方案二，FDC2214 输出的数据为每帧 28 位。两者相比，方案一的数据分辨率比方案二的低，因此从数据精确性与可靠性的角度考虑，选择方案二。

1.2 数据拟合方案

方案一：使用线性函数进行拟合。将数据拟合成纸张数量-电容容值的线性函数。

方案二：使用反比例函数进行拟合。将数据拟合成纸张数量-极板间距的反比例函数。

方案选择：方案一，线性函数代码实现简易，数据拟合速度较快，但需要预先设定的参数较多；方案二，所需参数较少，但是代码实现复杂，且大量乘除运算使拟合速度降低。从方案实现的简易性和数据处理的速度考虑，选择方案一。

2. 方案描述

系统框图如图 1 所示。本系统主控采用 Artix-7 系列 FPGA，进行 FDC2214 的读写控制，数据的接收、处理，以及 LCD 的显示驱动。纸张计数装置中不同的纸张数量会使两极板间距不同，产生与间距相对应的电容值，该电容和 FDC2214 外部 LC 网络产生谐振。FPGA 通过 IIC 总线获取 FDC2214 模块的数据后进行数据转换，将转换所得的纸张数量显示在 LCD 屏幕中。

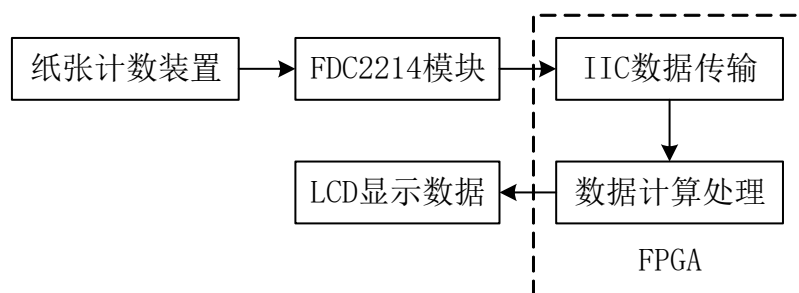


图 1 系统框图

二、理论分析与计算

1. 测量原理分析计算

本系统通过测量两极板间电容容值来计算纸张数量。当纸张数量不同时，极板电容也会不同。电容计算公式为：

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k} \cdot \frac{1}{d}$$

其中 ϵ 为空气介电常数， S 为极板正对面积， d 为极板间距，极板电容大小和极板间距呈反比关系，而极板间距 d 与纸张数量 n 呈正比关系，形如 $d = an + b$ （ a 为斜率， b 为常数），所以可以推得纸张数量-电容容值的函数关系式：

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k} \cdot \frac{1}{an + b}$$

然后通过“自校准”数据拟合出相应曲线。该曲线即可用于最终纸张数量的测量。

2. 抗干扰分析

由于导线自身也存在分布电容，而纸张数量变化引起极板间电容变化的量级都在 pF 级别，十分微小，所以连接极板与传感器芯片的导线也会对电容的测量产生较大干扰。本系统将导线固定在测量装置上，尽可能减小导线的干扰。

同时由于纸张厚度在 0.1mm 级别，若纸张之间出现间隙也会对测量造成干扰。所以本系统使用一个可靠的夹持装置，每次测量时都使用夹持装置将极板夹紧，以减少纸张间隙对电容测量的干扰。

3. 误差分析

由于本系统在进行数据拟合时需要转换的公式较多，导致进行一次数据传递与计算时会损失一定的精度。当精度误差逐步累加时，最后拟合曲线出现的误差会干扰纸张数量的测量。

同时，FDC2214 寄存器内的数据转换成电容容值时，需要使用公式

$$C_{\text{sensor}} = \frac{1}{L \cdot (2\pi f_{\text{sensor}})^2} - C, \quad f_{\text{sen}} = \frac{f_{\text{REF}} \cdot \text{DATA}}{2^{28}}$$

C 为并联传感器电容， DATA 为寄存器数据， f_{REF} 为时钟频率。该芯片需要稳定的时钟信号驱动，而 FPGA 的 IO 口所提供的时钟信号可能会有一定的抖动或偏差，进而会使测量值产生一定的误差。

三、 电路与程序设计

1. 电容传感器电路设计

电容传感器电路如图 2 所示。使用电容式传感芯片 FDC2214 进行设计，其中每个通道采用差分方式输入以减少周围环境的电磁干扰等情况。设置 $L = 18\mu\text{H}$ ， $C = 33\text{pF}$ ，考虑线路分布电容约 20pF ，则初始谐振频率为：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{18 \times 10^{-6} \times 53 \times 10^{-12}}} \approx 5.15\text{MHz}$$

选择品质因数较高的电感可以增强 LC 网络的选频特性从而提高芯片的采样准确率，减小误差。在本系统中，仅使用单路 FDC2214 模块的一个通道即可完成电容传感器电路的设计。

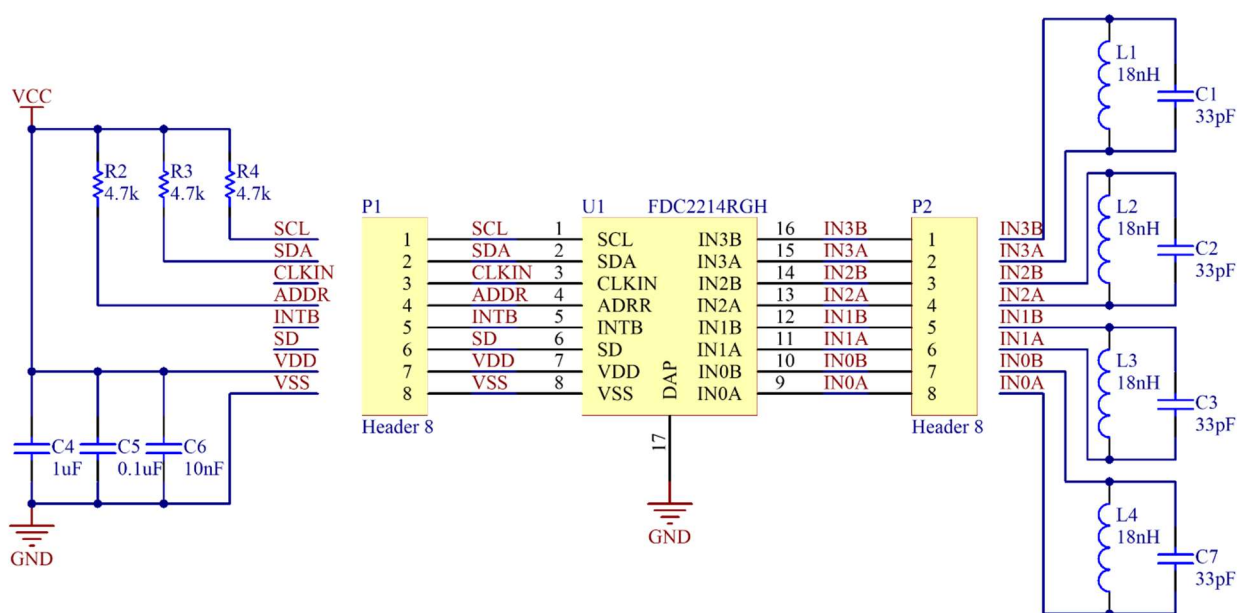


图 2 电容传感器电路图

2. 软件程序设计

软件流程设计如图 3 所示。在进行系统初始化后，进入起始页面，可以选择进入“自校准”和“测量”两个子页面。

在“自校准”页面，可以选择进入“纸张数量校准”或“短路电容校准”页面。在“短路电容校准”页面，可以通过按键确认获取当前电容值作为短路情况的阈值，一旦检测过程中所得超过该阈值则认为发生了短路；在“纸张数量校准”页面，可以通过触摸输入当前放入装置的纸张数量，并读取当前的电容值，重复以上过程并生成对应的拟合曲线。

在“测量”页面，可以通过触摸 LCD 屏幕上按键来读取当前的电容值，并代入之前生成的拟合曲线以确定放入装置的纸张数量。如果测量的数值超过之前设定的短路时的阈值，则显示相应信息表明系统处于短路状态。

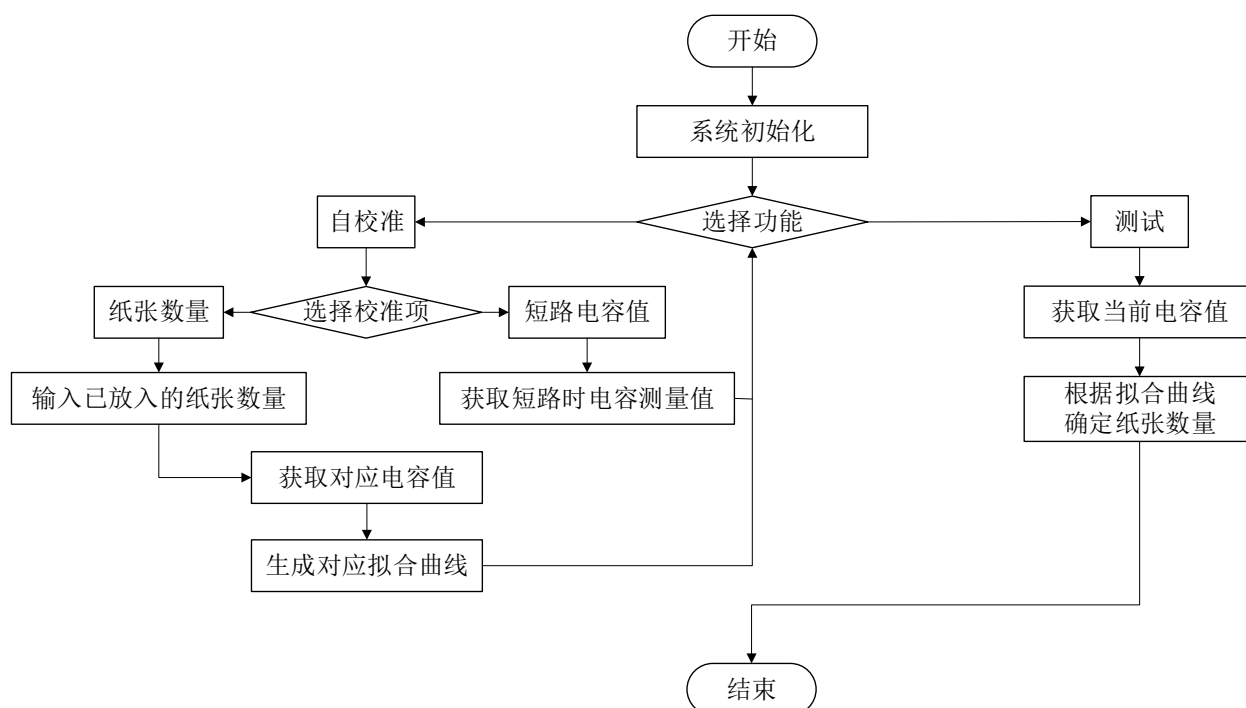


图 3 软件流程框图

四、 测试方案与测试结果

1. 测试环境

示波器:	Tektronix	MDO2002B 型数字示波器;
电 源:	ZhongCe	DF1743003C 型稳压源;
秒 表:	CASIO	HS-80TW 型数字秒表。

2. 测试方案

2.1 短路测试方案

将两极板短接，先后按下 LCD 上的 Short Setting 和 Setting 键，通过 FPGA 监测并存储此时电容值的波动范围。在之后的纸张测试过程中，若某一时间段内系统采集并计算出的电容值在此范围之内，则判定为极板短路，并通过 LCD 显示其为短路状态。

2.2 给定纸张数为 1~10 张时的测试方案

按下 LCD 上的 Adjust 功能键，向装置中依次放入 1~10 张纸，同时在 LCD 上输入此时放入的纸张数，系统监测并存储该数值和采集到的电容值。再在 LCD 上按下 Start 功能键使系统进入纸张测试状态，在装置中放入 1~10 张数量不等的纸张，测试纸张数量并将其通过 LCD 显示。

2.3 给定纸张数为 15~30 张时的测试方案

按下 LCD 上的 Adjust 功能键，向装置中依次放入 15~30 张纸，同时在 LCD 上输入此时放入的纸张数，系统监测并存储该数值和采集到的电容值。再在 LCD 上按下 Start 功能键使系统进入纸张测试状态，在装置中放入 15~30 张数量不等的纸张，测试纸张数量并将其通过 LCD 显示。

2.4 给定纸张数为 30 张以上时的测试方案

按下 LCD 上的 Adjust 功能键，向装置中放入一系列 30 张以上的纸张，同时在 LCD 上输入此时放入的纸张数，系统监测并存储该数值和采集到的电容值。再在 LCD 上按下 Start 功能键使系统进入纸张测试状态，在装置中放入 30 张以上数量不等的纸张，测试纸张数量并将其通过 LCD 显示。

3. 测试结果与数据

3.1 短路测试

表 1 短路测试表

短接时电容值/pF	3.363	3.227	3.377	3.435	3.291	3.253	3.386	3.456
电容值波动范围记录/pF	最小值：3.227，最大值：3.456							
纸张测试时电容值/pF	53.624	108.762	90.388	3.339	78.621	3.298	77.219	68.942
短路标志是否显示	否	否	否	是	否	是	否	否

3.2 1~10 张数量不等纸张计数测试

表 2 纸张计数测试表

纸张数量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
计数正确率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
计数时间/s	3.3	3.2	3.3	3.3	3.3	3.4	3.3	3.3	3.4	3.3

3.3 15~30 张数量不等纸张计数测试

表 3 纸张计数测试表

纸张数量	15	17	19	20	22	24	26	28	30
计数正确率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100
计数时间/s	3.2	3.2	3.3	3.4	3.3	3.4	3.3	3.4	3.2

3.4 30 张以上数量不等纸张计数测试

表 4 纸张计数测试表

纸张数量	31	33	35	38	40	42	44	46	48	50
计数正确率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
计数时间/s	3.2	3.3	3.4	3.3	3.3	3.3	3.4	3.3	3.4	3.3

4. 测试结果分析

4.1 短路测试结果分析：由数据可知，短路测试所得的短路电容值在 3.227pF~3.456pF 之间，在纸张测试时若发现两极板短路，则电容值在上述所求范围内，且 LCD 会显示其为短路状态，满足题目要求。

4.2 1~10 张数量不等纸张计数测试结果分析：由数据可知，系统在进行“自校准”后通过拟合的曲线可以正确判断纸张数量信息，且单次测量的响应时间小于题中要求的 5 秒，指标满足题目要求。

4.3 15~30 张数量不等纸张计数测试结果分析：由数据可知，系统在进行“自校准”后通过拟合的曲线可以正确判断纸张数量信息，且单次测量的响应时间小于题中要求的 5 秒，指标满足题目要求。

4.4 30 张以上数量纸张计数测试结果分析：由数据可知，系统在进行“自校准”后通过拟合的曲线可以正确判断纸张数量信息，且单次测量的响应时间小于题中要求的 5 秒，指标满足题目要求。

五、 参考文献

- [1]. 德州仪器高性能模拟器件高校应用指南.2015,德州仪器半导体技术有限公司
- [2]. 罗杰,谢自美.电子线路-设计·实验·测试(第五版),2015,电子工业出版社.
- [3]. Capacitive Proximity Sensing Using FDC2x1y.2017,德州仪器半导体技术有限公司
- [4]. 康华光.电子技术基础(模拟部分)(第六版).2013,高等教育出版社.
- [5]. 康华光.电子技术基础(数字部分)(第六版).2013,高等教育出版社.