

【文章编号】 1004-1540(2007)02-0103-05

# 基于 CPLD 的电容式角度传感器测量电路设计

陈洪飞, 杨其华, 刘钢海

(中国计量学院 机电工程学院, 浙江 杭州 310018)

**【摘要】** 在介绍一种变面积电容原理的非接触式角度传感器的基础上, 提出了两种电容式角度传感器的测量方案. 鉴于数字方法实现的测量方案性价比更加优越, 从而构建了基于 CPLD 的电容式角度传感器测量电路. 借助于复杂可编程逻辑器件完成传感器信号的鉴相、计数等处理. 通过电路的试验以及误差分析, 得出该测量电路具有精度高、速度快、抗干扰强、稳定性好等特点.

**【关键词】** 电容式传感器; 角度信号测量; 复杂可编程逻辑器件; 鉴相

**【中图分类号】** TP212.1

**【文献标识码】** A

## Design of a measuring circuit about a capacitive angular sensor based on CPLD

CHEN Hong-fei, YANG Qi-hua, LIU Gang-hai

(College of Mechatronics Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Two schemes measuring the sensor signal were proposed upon introducing a non-contact area-changing capacitive angular sensor. Considering its better performance realized in the digital way, the measuring circuit based on CPLD was constructed. The phase detecting and counting of the sensor signal has achieved in virtue of the complex programmable logic device. The circuit's better precision, faster response time, stronger anti-interference ability and perfect stability are validated by the experiments for the circuit and error analysis.

**Key words:** capacitive sensor; angle measurement; complex programmable logic device; phase detecting

电容式传感器广泛用于位移、振动、角度、加速度等机械量的精密测量中, 以其小功率、高阻抗、小静电引力、本身发热影响小的特点在众多传感器中占有一席之地<sup>[1]</sup>. 变面积电容原理的非接触式角度传感器便是其中的一种. 电容式传感器原始输出信号的测量方法很多, 如数字测量、模拟测量、数字模拟混合测量, 每个方法都有自

身的特点. 本文针对特定的角度传感器结构原理, 在比较模拟、数字测量方案基础上, 设计了一种以 CPLD 为核心器件的数字化测量电路. 通过增加测量电路中的计数位数、增大计数高频源的频率<sup>[2]</sup>等可以不断提高测量电路的分辨率. 该测量电路还可以应用于其他脉冲信号测量系统中.

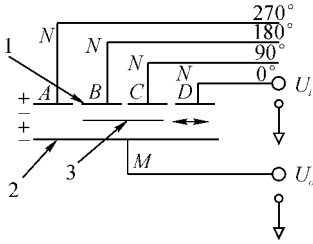
**【收稿日期】** 2007-03-22

**【项目基金】** 浙江省重点科研项目 (No. 2003C21032)

**【作者简介】** 陈洪飞 (1983 - ), 男, 辽宁葫芦岛人, 硕士研究生. 主要研究方向为测控技术.

## 1 角度传感器结构原理

角度传感器的基本结构由两个极板组成,一个为固定极板,另一个为可动极板.图1为一种极板结构设计实例.



1—定极板电极组(N极);2—定极板(M极);3—动极板

图1 电容式角度传感器结构设计

定极板外环每个连续测量区域分别由A、B、C、D四块扇形极板组成,每块极板加载相位差为90°的多相激励信号源,构成图1电极组的N极,定极板内环(M极)为一封闭独立圆环.M、N极均在同一平面内,并且用窄小的绝缘环隔开,由导电材料构成的动极板起到电场合成与耦合的作用.图2为传感器结构的立体视图.

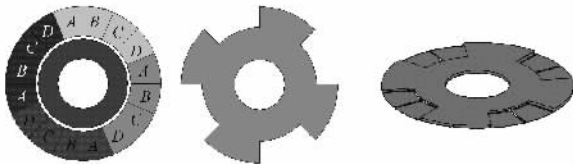


图2 传感器结构

图1中定极板加载的四相激励信号源为:

$$U_i = \sin\left(\omega t + \frac{(i-1)\pi}{2}\right) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

传感器工作时动极板的位置与待测角位移相对应(动、定极板间距 $d = 0.5 \text{ mm}$ ),信号 $U_o$ 即为传感器输出的合成电场信号, $U_i$ 为激励基准信号源.激励信号源电场

$$\vec{E}_r = \sum_{i=A}^D U_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (2)$$

式(2)中 $U_m$ 为源电场幅值(取5 V);图3为合成电场的矢量示意图,其中 $d_9$ 位置的合成电场为

$$\vec{E}_{d_9} = \vec{E}_A + (\vec{E}_B - \vec{E}_D) \quad (3)$$

基于传感器结构特点,建立串联RC模型,得

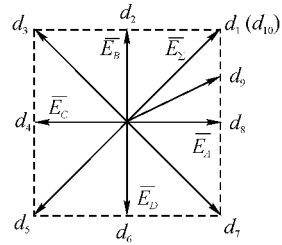


图3 极板电场合成示意图

到从M极引出的耦合电场信号:

$$\vec{E} = \sum_{m=A}^D \frac{\vec{U}_m}{R_h + \frac{1}{j\omega C_m}} \times R_h \quad (4)$$

式(4)中 $R_h$ 为传感器后续测量电路的等效电阻, $C_m$ 为电容极板的耦合电容.由于传感器动极板转动时,四组极板之间耦合面积不同,导致耦合信号幅值不同,在定极板上叠加之后形成了具有噪声与高次谐波的微弱耦合信号.由于本文电容式角度传感器自身结构特点,当其物理转动90°,输出周期性的耦合电场信号.

## 2 测量电路方案

鉴于传感器原始耦合信号特点,首先对其进行放大和滤波处理.耦合电场信号频率为2 kHz,为了提高品质因数Q,采用高Q二阶带通滤波器,品质因数 $Q=30$ ,中心频率 $f_0=2 \text{ kHz}$ .滤波之后得到频率 $f=2 \text{ kHz}$ 的正弦波信号.针对角位移信号的测量可以有两种测量方案,在信号输出方式及与后续模块连接、抗干扰性能、精度与成本等方面各有所长.

### 2.1 模拟测量电路

分别对放大滤波后的耦合电场信号与加载A极板的激励基准信号源 $U_i$ 进行整形处理,得到耦合脉冲信号 $U_a$ 和基准信号 $U_{iz}$ .对信号 $U_a$ 与 $U_{iz}$ 之间的相位差进行鉴相处理.鉴相电路可以由与非门组成的RS触发器完成,两信号经过微分电路后分别与触发器的RS端相连,输出信号再经过RC平均电路把角位移信号转化为直流信号.由RS触发器输出的鉴相结果经过由电阻、电容、二极管组成的微分电路后,输出角位移方向信号以及90°计数脉冲信号(方向盘每转过90°输出一个脉冲).

### 2.2 数字测量电路

采用可编程逻辑器件CPLD为核心的测量

电路实现对角位移信号的鉴相、计数、存储、传输等控制,计数就是利用测频法。测频法即在闸门时间  $T_w$  内,记录被测信号的变化周期数(或脉冲个数)  $N$ ,则被测信号的频率为:  $f_x = N/T_w$  [3]。由于角位移信号  $U_a$  与基准信号  $U_{iz}$  存在相位差,所以利用沿触发的方式对其鉴相 [4]。然后利用高频源信号对鉴相结果进行脉冲计数、存储,根据计数结果的瞬时改变来判别角位移方向,最后通过控制信号把测量结果传输到处理器。

为了简化电路、提高测量电路的可靠性和准确性,决定采取数字测量方案实现角位移信号测量。

### 3 数字测量电路设计

选用 ALTERA 公司的 CPLD 芯片 EPM7128 作为测量电路的核心器件,在其数字处理前端对滤波后波形采用斯密特整形,以确保计数信号上下沿的陡直,避免因脉冲沿抖动影响计数准确度 [5]。

#### 3.1 鉴相与计数

鉴相是测量电路设计的重点,直接影响测量精度。EPM7128 的外围电路接口电路如图 4 所示,

其中高频源选用有源晶振生成,电路程序代码的调试与下载都是在 MUX+plus II 环境下通过 ALTERA 的 JTAG 下载线完成的。CTL1、CTL0 为上位机控制信号,DATA0 至 DATA7 为测量数据输出端口。

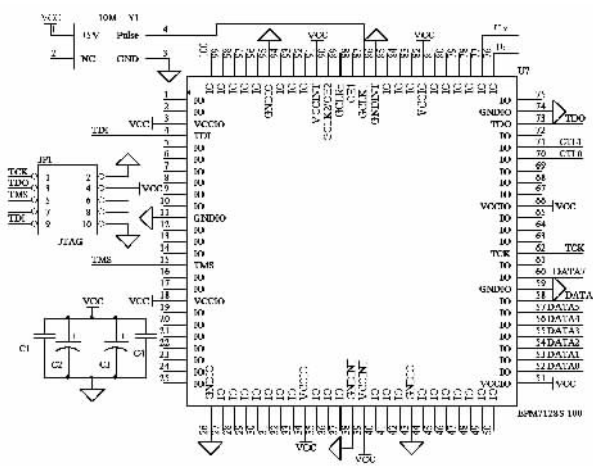


图 4 测量电路硬件设计

整个测量电路的逻辑框图如图 5 所示:

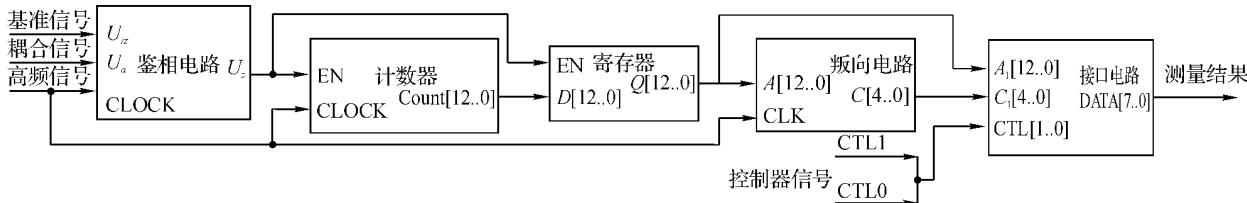


图 5 电路的逻辑框图

鉴相功能主要由 VHDL 语言实现,当基准信号源  $U_{iz}$  出现上升沿时  $U_z$  为高电平;当角度位移信号  $U_a$  出现上升沿时  $U_z$  变为低电平,  $U_z$  的频率与基准信号源频率相同,占空比随着传感器转角变化而改变。通过 MUX+plus II 仿真得到鉴相结果 ( $U_a$  滞后  $U_{iz}$ ) 如图 6 所示,超前的鉴相结果波形与图 5 类似。

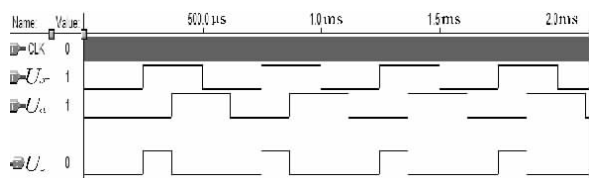


图 6  $U_{iz}$  超前  $U_a$  时  $U_z$  波形

接下来对鉴相结果  $U_z$  计数,高频源信号频率  $f_h = 10$  MHz,原理就是当  $U_{iz}$  信号出现上升沿时计数器开始对高频源计数,下降沿时停止计数,与此同时计数结果传输到计数寄存器。仿真结果如图 7 所示。

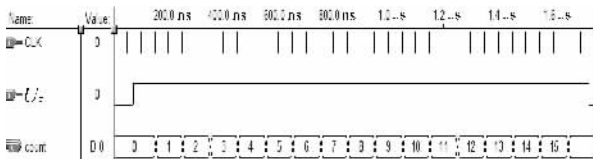


图 7 对角位移  $U_a$  的计数结果

#### 3.2 计数结果处理

激励信号频率设定为  $f = 2$  kHz,所以最大计

数结果为5 000,采用13位计数器就可以满足计数要求.针对于循环输出的信号,设计一个进位累加器,把先前的转角累加起来,从而实现大范围角度的精准测量.

实现累加的方法就是当计数结束后,把此时计数结果与结束之前的计数结果进行比较,若计数结果(二进制表示)的高两位从00变成10,则正向转过 $90^\circ$ ,计数结果进位位 $C$ (5位二进制,初始值为15)加1;反之从10变成00,即反向转过 $90^\circ$ ,计数结果进位位减1.通过对 $C$ 数值检测判定传感器的转动方向.

最后CPLD根据上位机或者其他控制器的控制信号CTL1与CTL0来传输角位移测量结果.当其逻辑组合为00时,DATA0至DATA7输出为计数结果的低8位;为01时,DATA0至DATA4输出为计数结果的高5位,DATA5至DATA7位补零;为10时,DATA0至DATA4为计数进位结果.13位计数器的计数结果用 $\text{Count}_{13}$ 表示,上位机

通过对计数结果的处理得到测量的角位移信号

$$\varphi = \frac{\text{Count}_{13} \times 90^\circ}{5\,000} + (C - 15) \times 90^\circ \quad (5)$$

## 4 测试电路试验

试验传感器样品来自实验室自制,极板采用图1结构的 $90^\circ$ 区域4极板连续测量的4组极板覆盖整个圆周,动极板与定极板径向尺寸相同,内外圆的半径分别为 $r=15\text{ mm}$ , $R=36\text{ mm}$ .动、定极板间距 $d=0.5\text{ mm}$ .激励信号源频率 $f=2\text{ kHz}$ , $N$ 极板区域为扇形结构.

测量电路中高频源频率 $f_h=2\text{ MHz}$ .标定传感器采用2 500 ppr的光电编码器(4倍频,理论分辨率 $0.036^\circ$ ),测量电路最小角位移的分辨率为 $0.011^\circ$ .电路输入端引入两路具有相位差的方波信号(峰值5 V),在相位差为 $0^\circ\sim 180^\circ$ 之间调节输入信号的相位,记录测量电路的输出数据结果得到试验数据如表1.

表1 试验测试数据

转过角度( $^\circ$ )	2.12	5.38	8.59	10.24	20.67	30.57	45.19	60.54	68.97	75.03
计数结果	110	291	467	559	1 132	1 676	2 480	3 323	3 788	4 121
计数进位位	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
转过角度( $^\circ$ )	80.38	88.26	96.33	110.07	125.47	146.59	162.46	175.84	190.91	203.31
计数结果	4 416	4 849	292	1 148	1 895	3 058	3 931	4 665	493	1 176
计数进位位	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2

从试验结果可以看出,测量结果偏差很小,线性度高,线性度为 $\pm 0.42\%$ (而模拟测量的线性度为 $\pm 0.95\%$ ,并且抗干扰性差).试验中若人为加入噪声干扰,所得测量结果与上述结果几乎等同.试验结果证实基于CPLD器件的数字测量电路精度高、误差小、线性度高、抗干扰性强.由于CPLD器件芯片价格在40元左右,因此具有很高的性价比.

## 5 误差分析

试验测量结果与标定传感器测量结果偏差很小.主要是由测量电路中选用器件的时延以及试验时转动传感器时手抖动引起.测量电路的最小角位移的分辨率则与数字电路的高频源频率

相关.

从图2中不难看出,动极板在A~D四个电极区域移动中,合成电场幅值是一个周期波动物量,这完全可能通过电容参数形成一种系统性非线性误差.通过改变传感器测量电路的设计,使电路工作不依赖信号幅度和信号变化梯度,可以很大程度地减小这类误差.信号滤波后的数字鉴相处理方式具有这种优势<sup>[6]</sup>.

测量电路中,采用频率高达10 MHz的高频信号源对鉴相结果计数提高了计数结果的精确度;13 bit的计数器使得测量电路性能更加优越.

电路的信号输入端增加了施密特整形电路,确保了输入信号沿的陡直,而鉴相方式又是基于信号沿触发原理,大大提高了测量电路的抗干扰

能力,保证了测量电路的可靠性.测量电路的一体化设计,CPLD 器件的使用,则很大程度上简化了电路.

设定传感器转动角速度  $\omega_z(f_z)$ ,特定激励源频率下鉴相信号的变化频率为  $f_{ss} = \frac{2\Pi f_z}{\alpha}$  ( $\alpha$  为传感器转角).如果后续为模拟信号处理电路,其相应时间常数与动态精度相关;如果后续为数字测量电路,则与基准测量脉冲频率、门电路响应时间等相关.试验测量电路采用的 CPLD 器件门电路响应时间为  $5\text{ ns}^{[7]}$ .从而加快了测量电路的响应时间,增强了电路的动态性能.

测量电路的输入输出均采用光电隔离方式,输入、输出回路之间没有电气连接,也没有共地.因此可以隔离掉电源及地线上的干扰<sup>[8]</sup>.

通过以上分析可以看出,通过选用延时时间短、处理速度快的门电路、增大计数高频信号源频率以及增加光电隔离措施等,可以提高测量电路的测量精度,减小测量误差<sup>[9]</sup>.

## 6 结 论

CPLD 器件的使用,实现了基于电容式传感器角信号的数字化测量,扩大了测量范围;并且降低了设计成本,提高了设计灵活性,大大提高了系

统性能<sup>[10]</sup>.实验中的电容式传感器定极板个数还可以继续增加,数字电路仍然可以满足测量精度要求完成测量功能.该测量电路已经在在汽车转向控制总成样机的传感器信号测量中得到应用.

### 【参 考 文 献】

- [1] 叶湘滨,刘正春.一种可同时测量位移和角度的电容式传感器设计[J].传感技术学报,2004,23(3):34-35.
- [2] 梁国伟,赵蓓苗.双时间法在脉冲型流量传感器检定中的应用[J].中国计量学院学报,2004,13(1):52-55.
- [3] 曾红兵.基于 CPLD 的高精度频率测量仪的设计[J].湖南冶金职业技术学院学报,2004,4(4):300-302.
- [4] 陈裕国,冉全.基于 CPLD 和单片机的旋转变压器鉴相电路的设计[J].仪表技术,2006,5:32-34.
- [5] 张小林,李本会.一种发动机转速数字测量方法[J].传感器技术,2003,22(1):41-43.
- [6] 孟立凡,郑宾主.传感器原理及技术[M].北京:国防工业出版社,2005:68-83.
- [7] ALTERA LTD. MAX7000 programmable logic device data sheet[EB/OL].(2002-12-01)[2007-01-15].www.all-datasheet.com.
- [8] 马子余.16路光电隔离数字量输入板设计[J].宁波大学学报,2004,17(1):105-107.
- [9] 应卓瑜,梁坚,邵亮,等.基于 CPLD 的辨向细分电路设计[J].传感器技术,2005,18(1):143-145.
- [10] 张宝宜,邱安宏,苏文涛,等.基于 CPLD 的高精度位移测量电路的设计与实现[J].仪表技术与传感器,2006(7):41-43.