

## 低功耗低温漂数字式电容角位移传感器

张涛<sup>1,2</sup>, 位会兰<sup>1</sup>, 徐英<sup>1</sup>, 刘金川<sup>1</sup>, 高秀娟<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 吉林省白城师范学院数学系, 白城 137000)

**摘要:** 旨在研制一种测量范围为 $180^\circ$ 的新型数字式电容角位移传感器, 并着重解决传感器的功耗及温漂问题. 以比例式测量原理为基础, 给出优化的激励模式及实施电路; 根据转动极板为金属材质且电气悬空设计时计算角的象限判断标准和计算公式进行信号处理. 以超低功耗单片机作为信息处理的核心单元, 既保证了运算速度, 又可以实现通讯, 同时有效地降低了系统功耗, 实现了 $4\sim 20\text{ mA}$ 工业标准信号的远传, 甚至电池供电. 误差实验表明, 在 $-10\text{ }^\circ\text{C}\sim 55\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 传感器温漂最大值小于 $0.113\%/10\text{ }^\circ\text{C}$ .

**关键词:** 电容式角位移传感器; 比例式测量原理; 激励模式; 温漂特性; 超低功耗

**中图分类号:** TP212.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2006)05-0559-04

## A Low-Power Consumption, Lower Temperature Drift, Digital Capacitive Angular Displacement Transducer

ZHANG Tao, WEI Hui-lan<sup>1</sup>, XU Ying<sup>1</sup>, LIU Jin-chuan<sup>1</sup>, GAO Xiu-juan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Mathematics, Baicheng Normal College, Baicheng 137000, China)

**Abstract:** This paper aims to develop a digital capacitive angular displacement transducer with the  $180^\circ$  measurement range and settle the power consumption and temperature drift of the transducer. An optimal excitation pattern and its implemental circuit are given based on ratiometric measurement principle. The signal is processed according to the criterion of judging the quadrant and formula of angle when the rotor is overhung and made of metal. The core unit of the information processing is a ultralow-power consumption MCU, which can ensure the computing speed, realize communication, and lower the power consumption of system effectively. The transducer presented here can reach the  $4\sim 20\text{ mA}$  industrial standard signal output and even can be supplied by battery. Error experiments indicate that the maximal temperature drift of the transducer is lower than  $0.113\%/10\text{ }^\circ\text{C}$  when the temperature is from  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  to  $55\text{ }^\circ\text{C}$ .

**Keywords:** capacitive angular displacement transducer; ratiometric measurement principle; excitation pattern; temperature drift; ultralow-power consumption

角位移传感器从测量方式上可以分为接触式和非接触式. 接触式的角位移传感器有电位计式角位移传感器和应变片式角位移传感器等; 非接触式的角位移传感器有电容式角位移传感器和圆形感应同步器等. 非接触式角位移传感器的优点是不存在因机械接触而产生磨损, 其原理一般是根据磁场、电场和光学原理来确定角位移大小.

电容角位移传感器可将角度的变化量转变成电容

变化量, 属于非接触式传感器, 具有结构简单、灵敏度高和可靠性高等优点, 可应用于汽车、航天等角度定位监测系统, 具有广泛的应用前景. 但传统的电容传感器功耗较大、温漂特性不好, 因此不能在宽温环境下使用, 无法实现电池供电和 $4\sim 20\text{ mA}$ 远传, 限制了电容角位移传感器在工业领域中的使用.

1996年 Brasseur 提出了一种新型角位移传感器的测量原理<sup>[1]</sup>, 该原理同时具有比例特性和差动特

收稿日期: 2005-04-29; 修回日期: 2005-12-28.

作者简介: 张涛(1950—), 男, 教授, email\_ZT@eyou.com.

性,因而可以抵消相当程度的放大器增益误差和系统误差,在一定范围内能够消除大部分机械安装误差,如轴偏移和极板安装倾斜等.笔者以超低功耗 MSP430 单片机为核心,将原始激励模式进行优化,设计了激励模式发生器,尤其利用单片机内置的硬件乘法器进行比例测量原理的运算,既保证了传感器的实时性,又有效地降低了系统功耗.温度实验表明该电容角位移传感器具有良好的温漂特性.

### 1 敏感元件及其设计

电容角位移传感器采用平行板形式的敏感元件,分为静片和动片两部分.静片包括发射极板和接收极板,如图 1 所示.发射极板分成等面积的 8 瓣,对顶角两瓣电气相连,构成 4 个电容.为了提高电磁兼容(EMC)特性,发射极板和接收极板背面均覆铜接地,正面内外侧圆环亦覆铜接地构成保护环,如图 1 中 1、2 所示.

动片由两个等面积的对称叶片组成,叶片的圆心角为 90°.为了减少温度漂移,动片与轴采用低膨胀系数金属材料制成.

由于动片在发射极板和接收极板之间旋转,因此发射极板与接收极板所组成的 4 个电容值  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  和  $C_D$  随动片旋转而不同,当一定的激励施加在发射极板上时,这 4 个电容在接收极板上所产生的感生电荷也不同.

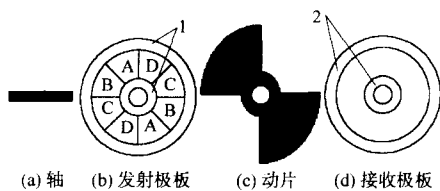


图 1 敏感元件结构

Fig. 1 Basic structure of the sensitive elements

### 2 激励模式的优化

针对本文的敏感元件结构,比例测量原理的时序如图 2 所示.图中 A、B、C 和 D 表示 4 个电容极板;P1、P2、P3 和 P4 为 4 个激励模式,表示不同时刻对 4 个电容极板施加不同的激励; $T$  表示对极板充电时间, $T_{AD}$  是  $n$  次 AD 采样时间之和.

本实验中采用 3.3 V 供电,主频 2.048 M,  $T = 1$  ms,用 12 位 AD 进行 8 次 AD 采样,采用文献[1]中给出的激励模式测得系统功耗为 3.53 mW,而采用图 2 的激励模式测得系统功耗仅为 2.5 mW.这里给出的

电容角位移传感器在本激励模式下可以实现 4 ~ 20 mA 标准信号输出.

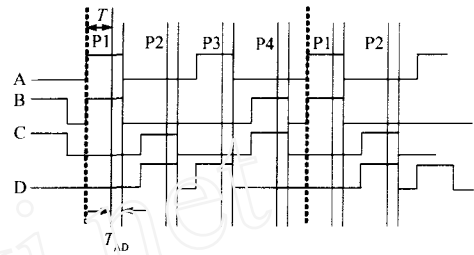


图 2 发射极板激励模式

Fig. 2 Excitation patterns at the transmitting segments

### 3 金属动片极板悬空时的角度计算公式

为了计算一个角度,需要对  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  和  $C_D$  4 个电容值进行测量.测量分为 4 个节拍 P1、P2、P3 和 P4.图 2 中高电平表示对该电容进行激励,并测量感生电荷得到相应电容值.如 P1 节拍,对 A 与 B 进行激励,并测量相应的感生电荷得到  $C_A$  与  $C_B$ ,P2 则测量  $C_C$  与  $C_D$ .当 4 个节拍结束后,可以得到 4 组电荷值,分别为  $s$ 、 $\underline{s}$ 、 $c$  和  $\underline{c}$ .同时,比例测量原理有如下定义,动片转动时,根据动片所转动的不同范围,将测量角度划分为 4 个区间,即 4 个象限,如图 3 所示.将 0 ~ 180°分为 4 个象限,每个象限有自己的 0°起始点.该 0°起始点位于该分瓣的角平分线处.整体测量以第一个象限的 0°为测量的 0°.则每个象限相对于第一个象限的 0°依次偏移了  $\beta$ ,分别为 0、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$  和  $3\pi/4$ .设动片相对于每个象限的 0°所转过的角度为  $\alpha_1$ ,则在 0 ~ 180°范围内,动片所转过的角度<sup>[2-3]</sup>

$$\alpha = \alpha_1 + \Delta\alpha = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{S - C \cdot \text{sign}(CS)}{S \cdot \text{sign}(CS) + C} + \beta \quad (1)$$

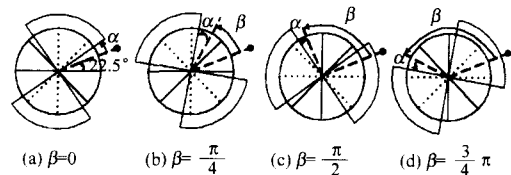


图 3 比例测量原理象限分布

Fig. 3 Quadrant distribution based on ratiometric measurement principle

式中: $S = s - \underline{s}$ ,  $C = c - \underline{c}$ .总结上述公式,可得表 1.公式在推导过程中,通过相比和相减,消除掉系统的放大器增益误差和偏移误差,计算结果只和敏感元件的线性

度相关.在测量过程中,AD的基准电压与计算结果无关;环境温度等共模信号对计算结果也没有影响;在一定程度内的机械误差,比如轴的偏移、极板的倾斜等也可以得到有效补偿.

表1 比例测量原理计算公式

Tab.1 Formula based on ratiometric measurement principle

象限	边界	偏移角	$\alpha_1 \times (8/\pi)$
1	$S \geq 0, C < 0$	0	$(S+C)/(-S+C)$
2	$S < 0, C \leq 0$	$\pi/4$	$(S-C)/(S+C)$
3	$S \leq 0, C > 0$	$\pi/2$	$(S+C)/(-S+C)$
4	$S > 0, C \geq 0$	$3\pi/4$	$(S-C)/(S+C)$

### 4 测量模块设计

角位移传感器系统由敏感元件、测量模块和智能单元等3部分组成,其中智能单元采用的是超低功耗单片机MSP430F149,其电源电压为1.8~3.6V,待机模式电流仅为1.6  $\mu\text{A}$ .活动模式下,电压2.2V,频率1MHz时电流也仅为280  $\mu\text{A}$ <sup>[4]</sup>.系统框图如图4所示.测量模块分为两部分,一是基于充放电原理的微小电荷检测电路,二是激励模块发生器.

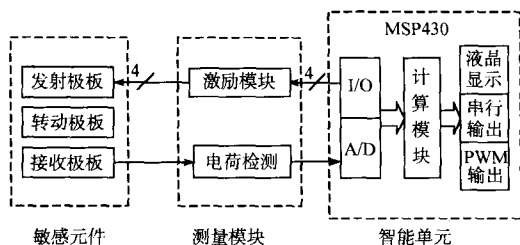


图4 系统原理框图

Fig.4 Block diagram of system principle

#### 4.1 基于充放电原理的微小电荷检测电路的设计

电容式角位移传感器需要解决的关键问题之一是要能有效地测出动片转动时,各个电容的微小变化量.在本传感器中,电容的变化只有几pF,而电路的杂散电容和分布电容等大约为几百pF左右.考虑到电路和系统的结构和复杂性,本设计采用的是文献[5]的基于充放电原理的微小电容检测电路.该电路的特点是电路结构简单,可以有效地消除电路中杂散电容和分布电容对被测电容的影响.文献[6—7]中给出了电路模型的优化参数.

#### 4.2 激励模式发生器的设计

基于比例测量原理的角位移传感器需要对敏感元件的感生电荷进行周期性采样,因而A、B、C和D上的

激励也是周期性的.文中给出的激励模式发生器是由430单片机和多路单刀双掷开关构成,如图5所示.A、B、C和D是发射极板上的分瓣单元,H是接收极板,E为电气地(如接地保护环).4个单刀双掷开关 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 用以选通发射极板单元,选通时序由430单片机4路I/O线输出控制( $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 和 $S_4$ ),同时将被选通的单元接入电荷检测电路,并以640kHz频率对被测单元进行充放电,其模拟开关 $K_1$ 、 $K_2$ 与 $K_3$ 、 $K_4$ 的控制时序反相.例如,当430单片机将单刀双掷开关控制端 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 或 $S_4$ 置高电平时,相应的单刀双掷开关 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 或 $M_4$ 切换到上侧,对选中单元A、B、C或D充放电,在接收极板上产生相应的感生电荷,此电荷经放大器输出电压信号;当430单片机I/O控制端置低电平时,发射极板接地,则H极板上无感生电荷产生.I/O口线按照图2中的激励模式进行控制.

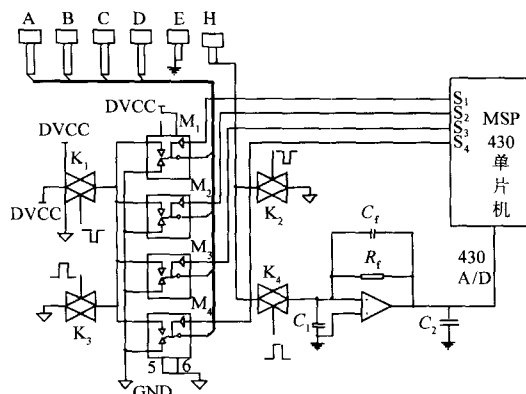


图5 激励模式的实现

Fig.5 Implementation of excitation patterns

### 5 温度实验

温度实验装置为重庆银河试验仪器有限公司的高低温交变试验箱HL4005U,温度范围为 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $130\text{ }^\circ\text{C}$ ,温度波动度和均匀度均为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,冷却方式是风冷.该试验箱带观察窗和脚轮选配计算机通讯接口RS485.

本研究的温度实验范围是 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $55\text{ }^\circ\text{C}$ .首先将传感器置于试验箱中,并将其角度调到某一值,温度从 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 开始变化,一直到 $55\text{ }^\circ\text{C}$ ,每次变化 $10\text{ }^\circ\text{C}$ ,每个温度点稳定时间为1.5~2h.测量在整个温度场变化过程中传感器角度的变化情况.然后角度值每次递增 $10^\circ$ ,在每个角度上重复上述温度实验,一直到 $170^\circ$ .实验数据见表2,温漂曲线如图6所示.温漂计算公式为

$$\delta_i = \frac{\theta_{i,max} - \theta_{i,min}}{\theta_{FS}} \times \frac{10^\circ}{\Delta T} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $\delta_i$  为第  $i$  个试验点在  $-10^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$  范围内每  $10^\circ\text{C}$  的温漂； $\theta_{i,max}$  为第  $i$  个试验点在  $-10^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$  范围内的最大值； $\theta_{i,min}$  为第  $i$  个试验点在  $-10^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$  范围内的最小值； $\theta_{FS}$  为传感器量程， $\theta_{FS} = 180^\circ$ ； $\Delta T = 65^\circ\text{C}$ （即  $55^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C})$ ）。

温漂的标准不确定度计算公式为

$$\sigma(\bar{\delta}) = S(\delta_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2} \quad (3)$$

式中  $\bar{\delta}$  为整个实验过程中的平均温漂。

表 2 传感器温度实验

Tab. 2 Temperature experiment of transducer

动片转过 的角度/ $^\circ$	温度实验过程中 测得的角度值		温度每变化 10 $^\circ\text{C}$ 的温漂 $\delta_i/\%$
	$\theta_{i,max}/^\circ$	$\theta_{i,min}/^\circ$	
10	10.51	9.22	0.110
30	30.35	29.60	0.064
50	50.58	49.52	0.091
70	70.23	69.37	0.074
90	90.12	89.35	0.066
110	110.58	109.62	0.082
130	130.34	129.49	0.073
150	150.63	149.53	0.094
170	70.25	68.93	0.113

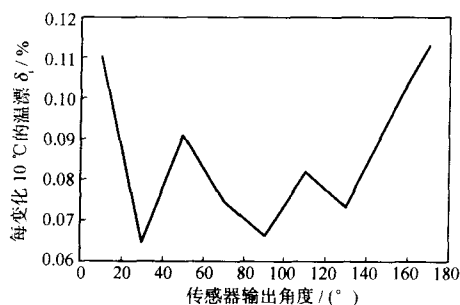


图 6 温漂曲线

Fig. 6 Curve of temperature drift

实验数据表明，最大温度漂移为  $0.113\%/10^\circ\text{C}$ ，最小温漂为  $0.064\%/10^\circ\text{C}$ ，平均温漂为  $0.085\%/10^\circ\text{C}$ 。温漂的标准不确定度为  $0.6\%/10^\circ\text{C}$ 。

## 6 结 论

(1) 给出了一种基于比例测量原理的电容角位移传感器的优化激励模式，以及该模式的发生器设计电路。这种优化激励模式可以有效降低系统功耗，实现  $4 \sim 20 \text{ mA}$  标准信号输出或电池供电，使用  $3.3 \text{ V}$  电池供电系统功耗仅为  $2.5 \text{ mW}$ 。

(2) 给出的电容角位移传感器具有良好的温漂特性。实验结果表明，最大温度漂移仅为  $0.113\%/10^\circ\text{C}$ ，温漂的标准不确定度为  $0.6\%/10^\circ\text{C}$ 。表明该电容角位移传感器可以长期运行于恶劣的工矿条件中。

### 参考文献：

- [1] Brasseur G. A robust capacitive angular position sensor [C] // *IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology (IMTC/96)*. Brussels, Belgium, 1996:1081—1086.
- [2] Xu Ying, Zhang Tao, Liu Jinchuan. Investigation of a capacitive angular displacement sensor based on ratiometric measurement principle [C] // *International Symposium on Precision Mechanical Measurements (ISPMM' 2004)*. Beijing, China, 2004:241—243.
- [3] Xu Ying, Zhang Tao, Zhang Rong. Optimization design on multi-blade capacitive angular sensor [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2003,30(4):51—54.
- [4] 魏小龙. MSP430 系列单片机接口技术及系统设计实例 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2002.  
Wei Xiaolong. *Interface Technology and System Design Example of MSP430 Series* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2002 (in Chinese).
- [5] Huang S M, Green R G. A high frequency stray-immune capacitance transducer based on the charge transfer principle [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1988, 37(3): 368—373.
- [6] 徐英. 新型智能金属管浮子流量计的研究 [D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院, 2002.  
Xu Ying. *Research on New-Style Smart Metal Tube Float Flowmeter* [D]. Tianjin: School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, 2002 (in Chinese).
- [7] 刘金川. 比例测量原理的电容角位移传感器的研究及应用 [D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院, 2004.  
Liu Jinchuan. *The Study and Application of Ratiometric Measurement Principle Capacitive Angular Displacement Sensor* [D]. Tianjin: School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, 2004 (in Chinese).