

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.05.010

# 容栅式旋转编码器的设计及应用

侯俊<sup>1</sup>, 周欢喜<sup>2</sup>, 肖伸平<sup>1</sup>, 李德<sup>3</sup>, 刘建阳<sup>3</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南鹰谷技术有限公司, 湖南 长沙 410000;  
3. 湖南长高高压开关集团股份有限公司, 湖南 长沙 410216)

**摘要:** 根据容栅旋转编码器的原理和预定技术指标设计了2款分辨率不同的容栅编码器电路。经过PCB设计、制版、组装、测试, 分析了相关的性能指标。实验结果显示: 所设计的容栅编码器均符合预设技术指标, 其中低分辨率容栅精度达到 $0.1^\circ$ , 高分辨率容栅精度达到 $0.03^\circ$ , 2款容栅编码器都具有较好的工程实用性。

**关键词:** 容栅传感器; 工作原理; PCB设计; 工程实用

中图分类号: TH712

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)05-0045-06

## Design and Application of Capacitive Grating Rotary Encoder

Hou Jun<sup>1</sup>, Zhou Huanxi<sup>2</sup>, Xiao Shenpin<sup>1</sup>, Li De<sup>3</sup>, Liu Jianyang<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. Hunan Eagle Valley Technologies Limited, Changsha 410000, China;  
3. Hunan Changgao High Voltage Switchgear Group Co., Ltd., Changsha 410216, China)

**Abstract:** According to the principle of the capacitive grating rotary encoder and the predetermined technical indicators, the circuits of 2 capacitive grating encoders of different resolutions are designed. Through PCB design, plate making, assembly and testing, the relevant performance indicators are analyzed. The experimental results show that the designed capacitive grating encoders accord with the predetermined technical indicators, the low resolution capacitive grating precision reaches  $0.1^\circ$  and the high resolution capacitive grating precision reaches  $0.03^\circ$ , and the 2 encoders both have good engineering practicability.

**Keywords:** capacitive sensor; working principle; PCB design; engineering practicability

## 0 引言

容栅传感器是一种利用电容耦合作用, 通过测量不同电容器上的电信号相位来精密测量位移的电子器件。现在市场上测量位移或者角度的精密仪器较多, 比如电位计、旋转变压器和光电编码器等。随着精密系统的逐渐发展、对测量元件的要求也越来越高。对于传感器而言, 无论是精度、分辨率、体积和成本都成为传感器在市场上竞争的热点。旋转

式容栅传感器与其他形式的传感器相比, 具有制作成本低、分辨率和准确度高、测量速度快和对使用环境要求不高等突出的特点, 因此在电子测量技术中占有十分重要的地位<sup>[1]</sup>。根据网络检索, 国内外对于容栅传感器的研究是较为火热的。首先, 容栅传感技术的原理较为简单、容栅理论研究较为成熟。其次, 市场上应用较多的直线型容栅, 比如数字式游标卡尺, 同时也有很多工业测量应用了直线型数字容栅测距技术, 如皮草厚度测量等。尽管对圆形

收稿日期: 2015-08-03

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ5021), 湖南省教育厅重点项目基金资助项目(14A038)

作者简介: 侯俊(1991-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复杂机电系统的集成与协调控制,  
E-mail: 164213837@qq.com

容栅有很多研究成果,但是形成产品的几乎为零。圆形的容栅传感器相对于直线型的容栅传感器是有一定的优势:首先,直线型容栅传感器会受到长度的限制,而圆形的容栅作为测角元件则能够360°无死角转动;其次,圆形的容栅传感器的体积通常要比直线型容栅小很多,如果加工精度能达到要求,就可以根据其所在系统的结构要求设计大小,这对精密系统是至关重要的。

本文基于1款用于保持视轴稳定的伺服控制平台的测角元件的性能要求和结构要求,设计了2款在外形结构符合安装要求和性能符合系统对测角传感器要求的容栅旋转编码器,使用Cadence完成了对原理图和PCB板的绘制、通过焊接、调试、应用测试,最终通过实验说明了本次设计的合理性和实用性。

### 1 容栅旋转编码器的结构和工作原理

#### 1.1 容栅旋转编码器的结构

容栅传感器现在应用较多的是用在数字式游标卡尺和千分尺的测量功能元件,由动栅和静栅2部分组成。在数字式游标卡尺中,动栅上布置发射电极、接收电极、LCD、电池等有源电路,定栅上布置反射电极和屏蔽电极等无源电路<sup>[2]</sup>。

如图1所示,容栅旋转编码器的动栅和静栅2部分,都为精密加工的印刷电路板<sup>[3]</sup>。容栅的工作原理总结起来可分为2个部分,电容耦合和信号解耦原理、配套的结构组成如下。

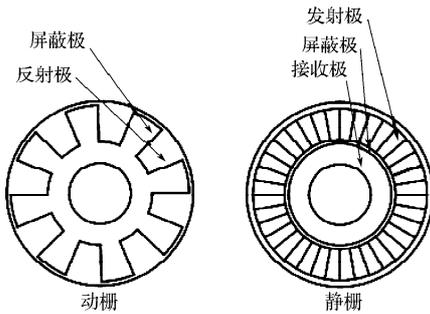


图1 旋转式容栅的结构组成

Fig.1 The structure of the rotary capacitive gate

动栅和静栅均为预定大小的圆形结构。电容耦合主要由3种电极片完成,即发射板、反射板和接收板。电机片的分布位置可根据具体情况而定,一般情况下发射极和接收极分布在静栅,屏蔽极则分布在发射极和接收极之间,其目的是防止发射极和接收极之间的直接电容耦合。动栅上分布有反射极,反射极之间也分布有屏蔽极,并且两者的宽度一致。不管是动栅上的屏蔽极还是静栅上的屏蔽极,作用都是防止直接电容耦合,所以对于屏蔽极的处理都是

接地。动栅上分布有若干的发射极片,其数量和间隔可以根据容栅的设计尺寸和加工进度设置。通常把发射极片分为若干组,但是每组的个数都为8个,这与所加的激励信号有关系。动栅上一组发射极片对应静栅上的一个反射极和屏蔽极。在实际的应用过程中,动栅和静栅上分布的电极是可以互换的,不影响其电容耦合。动栅和静栅的装配方式为同轴平行装配,间距要考虑到实际情况,主要根据极间的信号耦合强度而定。

#### 1.2 容栅旋转编码器原理的简要分析

在动栅的一组发射电极上分别加上一组等幅、同频、相位依次相差 $\pi/4$ 的方波激励电压信号 $U_i(t)(i=0, 1, \dots, 7)$ 。在电路的设计过程中,编号相同的发射电极片是相互连接的,所以编号相同的发射电极片极上的信号相同。经过发射机和反射极,反射极和接收极间的电容耦合,在接收极上形成输出信号,可以设计信号分析电路对信号进行滤波、解耦等运算,最终得到需要的位置、角度等信息。

根据上述的圆形容栅的结构组成,容栅其实可以简化等效为一组电容 $C_i(x)(i=0, 1, \dots, 7)$ 。这组电容器共有8个电容组成,每个电容所加的激励信号如图2所示。假设 $C_i(x)$ 用来表示发射极和反射极间的电容耦合所形成的电容器, $C_r$ 代表反射极与接收极相互耦合之后形成的电容器,由圆形容栅的机构组成可知,静栅上的一组反射极和屏蔽极对应动栅上的一组发射极,而且所有的栅极都是等距圆形排列,接收极和反射极的间距、相对面积、介电常数均为定值,所以接收极和反射极的极间电容耦合也是一个常数,即 $C_r$ 为一个常数。

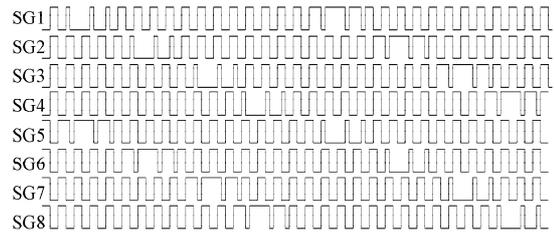


图2 激励驱动信号时序

Fig.2 Timing of the drive signal

旋转式容栅工作原理数学推导如下。

激励信号 $U_i(t)$ 通过电容 $C_i(x)$ 和定值电容 $C_r$ 耦合后,得到传感器的输出信号<sup>[4]</sup>。不考虑输出阻抗和电磁干扰等条件的理想情况下,对各信号归一处理,可得下式:

$$U_0(x, t) = \sum_{i=0}^7 U_i(t) \cdot C_i(x), \tag{1}$$

式中 $U_0(x, t)$ 表示容栅接收极的输出信号。

将  $U_i(t)$  和  $C_i(x)$  作傅立叶级数展开,选择合适的零点,可视为偶函数:

$$U_i(t) = \sum_0^{\infty} a_i \cos i\omega_u t, \quad (2)$$

$$C_i(t) = \sum_0^{\infty} b_i \cos i\omega_c t. \quad (3)$$

式(2)~(3)中:  $\omega_u = 2\pi/T$ ,  $\omega_c = 2\pi/W$ ,  $W$  为反射极板的间距,  $T$  为各发射电极片所加方波信号的周期。

容栅处理电路会滤去高次谐波,可以采用基波求解,将式(2)和式(3)代入并做归一化处理,可得:

$$U_0(x, t) = \sum_{i=0}^7 \cos i\omega_u t \cdot \cos i\omega_c t. \quad (4)$$

当容栅保持匀速旋转时,根据  $U_i(t)$  和电容  $C_i(x)$  的特点可将式(4)等效如下:

$$U_0(x, t) = k \cos\left(\omega_u \pm \frac{2\pi x}{W}\right). \quad (5)$$

式中  $k$  的符号为容栅动栅相对于静栅的旋转方向。

从上面的推导可以得出以下的结论:首先,由式(5)可知,在一个周期之内,容栅的接收极信号的位相与容栅动栅相对于静栅的位移呈现一个一次函数的关系,即一个接收信号的相位对应一个动静栅的相对位移;其次,输出信号是一个余弦信号,由表达式可知,每当输出信号的相位变化一个周期,动栅相对于静栅的运动位移为2个反射极片的节距。如果能够通过设计一款鉴别信号相位的电路对容栅的输出信号的相位进行检测,通过得到输出信号的相位从而能够得到容栅在单周期内动栅相对于静栅的相对位移。对位移信号进行进一步的处理,可得到角度、速度等所需的物理量。如果能对周期进行计数,那么就能够在一周的有限距离内对长距离进行测量。当然,经过电容耦合的接收极板接收到的信号在输入到鉴相电路之前还要进行处理,比如解调、滤波、放大和整形等等。

## 2 容栅旋转编码器的设计与实现

本文将对2款分辨率不同的容栅编码器展开设计与讨论。根据容栅原理,分辨率的高低主要取决于整圈发射电极片的个数,电极片的个数越多,则容栅编码器的分辨率就越高。当然,一圈发射电极片的个数在一定程度上还取决于加工精度。

### 2.1 发射电极

电极片的外形根据编码器安装部位的外形和尺寸自行设计而成,如图3所示。极片采取自定义外形的通孔焊盘实现,见图4。根据所在稳定平台对测量器件的尺寸要求形成自定义焊盘。内层及B面为圆

形焊盘,通孔直径8 mil。

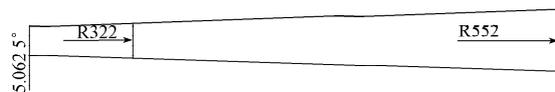


图3 电极片自定义外形

Fig. 3 The custom shape of electrode

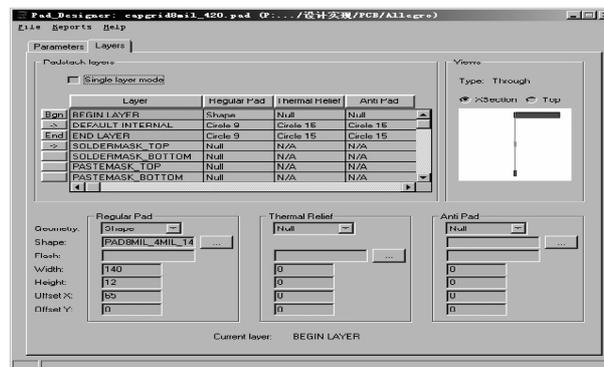


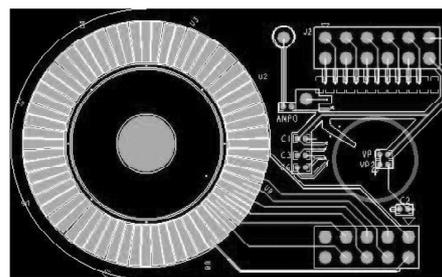
图4 电极片内层

Fig. 4 The electrode sheet layer

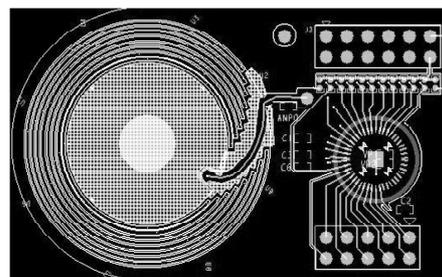
### 2.2 静栅

静栅上分布发射极片和接收极片。发射极和接收极之间有屏蔽极隔离开,屏蔽极接地。同时在接收极的中心部分开有6 mm的机械过孔,用以安装和固定。

低分辨率静栅发射极采用8组电极片组构成,每组电极片组由8片电极片构成。电极片扇脚为 $5^\circ$ ,按 $5.625^\circ$ 间隔均匀分布,极间间隙为 $0.625^\circ$ (最窄处约4.07 mil, 0.1 mm);接收极为一个圆环电极。具体设计如图5所示。



a) 静栅正面

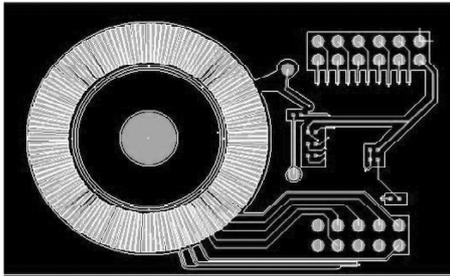


b) 静栅背面

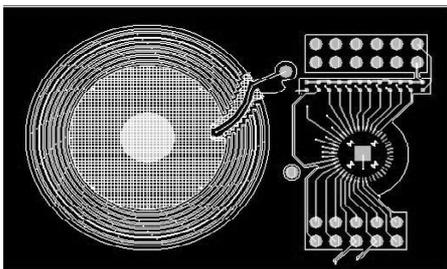
图5 低分辨率容栅

Fig. 5 A low resolution capacitive grid

高分辨率容栅发射极采用18组电极，每组8个电极片，电极片扇角 $2^\circ$ ，按 $2.5^\circ$ 间隔均布，极间间隙 $0.5^\circ$ （最窄处约4.07 mil, 0.1 mm）；接收极为一个圆环电极。具体设计如图6所示。



a) 静栅正面



b) 静栅背面

图6 高分辨率容栅

Fig. 6 A high resolution capacitive grid

### 2.3 动栅

动栅上分布有反射极和屏蔽极。高分辨率容栅反射极采用18个按圆周等角度均布的电极片，发射电极片与屏蔽极瓣的扇角 $9^\circ$ ，极片、极瓣按 $20^\circ$ 间隔均布，发射电极片与屏蔽极瓣的间隙为 $1^\circ$ ；齿轮状发射极间使用屏蔽填充。低分辨率容栅反射极采用8个按圆周等角度均布的电极片，发射电极片与屏蔽极瓣的扇角 $21.5^\circ$ ，极片、极瓣按 $45^\circ$ 间隔均

布，发射电极片与屏蔽极瓣的间隙为 $1^\circ$ 。2款动栅的底层都是铺网格铜接地，具体设计如图7所示。

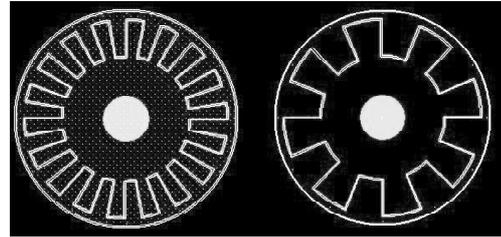


图7 动栅正面

Fig. 7 Front of a athletic grid

### 2.4 测量电路部分

旋转式容栅传感器的输出信号的相位反映了容栅的动栅和静栅的相对位移，对输出信号的相位检测电路的基本原理如图8所示<sup>[5]</sup>。

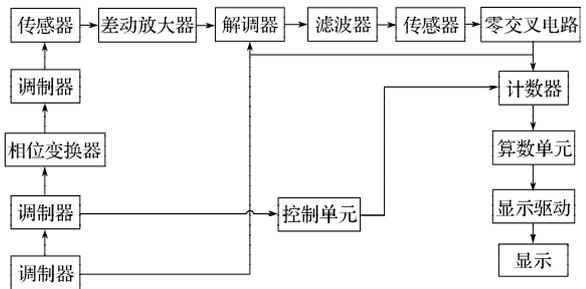


图8 鉴相电路框图

Fig. 8 Phase detector circuit block diagram

根据鉴相原理，设计了一款基于旋转型容栅的激励信号产生和输出信号处理的电路。鉴相电路采用的是GC7616A为信号处理主芯片，该芯片可以产生激励信号、处理输出信号并且还能将输出结果通过液晶屏显示，是一款容栅专用集成芯片，高集成、低功耗，其应用较广。测量部分原理图如图9所示。

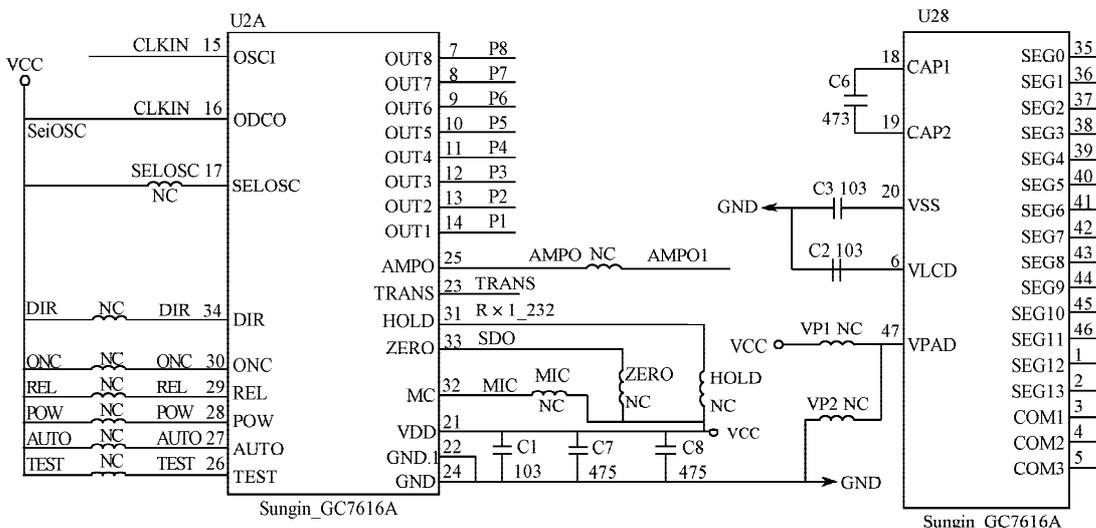


图9 测量部分原理图

Fig. 9 Schematic diagram for part of measurement

如图所示, PIN7至PIN14输出的是晶振的信号通过分频器分频后送到8路驱动电路进行相移,然后形成8路驱动信号,每路信号之间相位相差 $\pi/4$ 。这8路周期激励信号分别送到容栅传感器每一组的8个电极片上。信号经过圆形容栅传感器的动静栅的电容耦合形成接收信号,接收信号送至PIN23。PIN23连接的鉴相模块对接收极上的高频耦合信号进行之前还需要经过解调、滤波、放大和整形,最后通过液晶显示最终得到的动静栅的相对位移量<sup>[6-7]</sup>。如果对于预设的常数要求不同,还可对输出信号进行处理,通过进行逻辑上的转换可以形成不同类型的数据,如角度、速度等。

### 2.5 实物及说明

产品实物如图10所示,由于动栅的设计简单且相似,不予展示。左边的为前期产品,主要目的在于对原理的验证,对尺寸的要求不高,与后期所设计的容栅编码器相比,尺寸偏大。右边的为后期制作的2款容栅编码器,就尺寸而言,比前期产品的基础上缩小了一倍。后期的2款容栅的高低精度各有不同,可以根据实际需要进行设计,既充分利用了空间也减少了系统协调的难易程度。

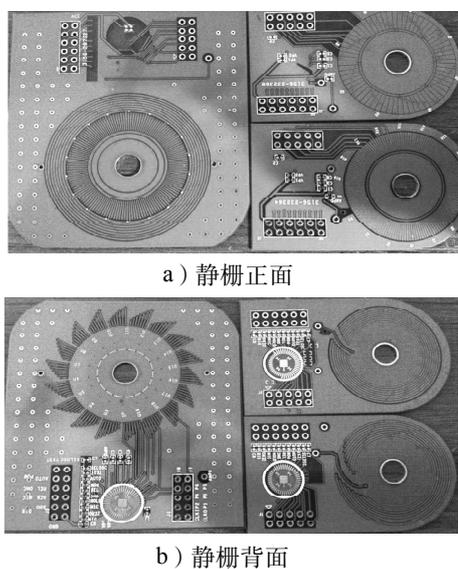


图10 容栅实物

Fig. 10 The capacitive grid

## 3 实验和结果分析

### 3.1 实验方案

实验采用长春华特编号为E1050D6的18位高精度光电绝对编码器作为测量标定基准。该光电式绝对编码器的分辨率为 $20''$ ,精度为 $40''$ ,无论是在精度还是分辨率上都远超出本文设计的容栅编码器的指标要求,因此,其适合作为标定基准。

将静栅贴装在编码器轴侧外壳端面,与外壳采用硅橡胶粘合。动栅贴装在定位盘内,通过定位盘连接到光电编码器主轴,动栅与定位盘采用绑定胶粘合。编码器采用外部5V供电,容栅采用纽扣电池供电。由于动栅和光电编码器保持同轴转动,在任意位置容栅编码器和光电编码器所转过的角度是相同的。通过比较容栅编码器和光电编码器的输出,就能对容栅编码器的性能指标进行测量。

### 3.2 实验结果和分析

经上述方法所得的部分实验数据如表1所示。通过与18位光电编码器的数据比较可得,容栅编码器相对于光电编码器的相对误差位于 $\pm 1\%$ 之间,说明本次设计的容栅是满足预定的设计要求的。

对于低分辨率容栅进行同样方式的实验,所得结果与高分辨组容栅一致。

表1 一组容栅的实验数据

Table 1 Experimental data for a group of capacitive grids

容栅读数/mm	光电读数	容栅递增/mm	光电递增	相对误差
0	2267A	3.01	140922	-0.001
3.01	248F1	2.99	149745	-0.002
6.00	26B65	3.01	158565	0.004
9.01	28BA1	3.01	166817	0.003
12.02	2AE9D	3.00	175773	0.004
15.02	2CEE5	2.97	184037	-0.001
17.99	2F0B6	3.05	192694	0.001
21.04	312F0	2.93	201456	0.001
23.97	3335D	3.06	209757	-0.001
27.03	3563B	3.04	218683	0.003
30.07	3773C	2.92	227132	-0.005
32.99	399B0	2.98	235952	0.005
35.97	3B976	3.07	244086	-0.004
39.04	3DD82	2.97	253314	0.002
42.01	3FE28	2.99	261672	-0.001
45.00	1E0F	3.05	7695	0.009
48.05	43A3	2.90	17315	-0.005
50.95	616D	3.06	24941	0.008
54.01	851B	2.96	34075	0.008
56.97	A614	3.09	42516	0.004
60.06	C73B	2.99	51003	-0.009
63.05	ED68	3.00	60776	0.008
66.05	10A18	2.96	68120	-0.005
69.01	12D2A	2.98	77098	0.003
71.99	14E8A	3.00	85642	0.003
74.99	16F06	3.07	93958	-0.004
78.06	1933E	2.96	103230	0.006
81.02	1B246	2.99	111174	-0.003
84.01	1D503	3.02	120067	0.003
87.03	1F5BD	3.03	128445	-0.002
90.06	2188F		137359	

将所得的实验数据进行后续处理,并对高低组容栅数据进行比较,所得结果如表2所示。

表2 2组容栅的数据比较

Table 2 Data comparison of two groups of capacity grids

容栅	电极片数	分辨率	精度/(°)
高分辨组	144	10 000	0.03
低分辨组	64	3 000	0.10

经过前面的论述以及对实验的总结,得到如下结论:容栅分辨率的高低主要取决于整圈发射电极片的个数,电极片的个数越多,则容栅编码器的分辨率就越高,当然,一圈发射电极片的个数在一定程度上还取决于加工精度。通过对容栅的自行设计,不仅能在很大程度上降低测角测距原件的生产成本,而且能够根据不同产品的实际要求设计出精度不同的容栅编码器,实现资源的合理化应用。容栅对工作环境也有一定的要求,所以在后期的装调中,将使用金属屏蔽罩对容栅进行封装,减少电磁干扰。

#### 4 结语

经过对容栅编码器的设计和实现,说明了容栅传感器的可行性。本研究使得取代旋变编码器成为稳定平台的测角元件成为可能。相比旋变编码器而言,容栅编码器能在低成本下实现平台所需的精度和准确度,并且结构简单,易于维护和修理。当然,现阶段的容栅编码器也存在不足,比如数据更新速度低等,所以还需努力,不断改进。

#### 参考文献:

[1] 张增耀,骆家贤.容栅技术[M].北京:中国计量出版社,2002:35-40.  
Zhang Zengyao, Luo Jiaxian. Technology of Capacitive

Grid[M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 2004: 35-40.

- [2] 张荣.容栅旋转编码器原理及应用[J].传感器世界,2006,12(2):21-24.  
Zhang Rong. Principle and Application of Grating-Shape Capacitive Rotary Coder[J]. Sensor World, 2006, 12(2): 21-24.
- [3] 于洵,马林.一种基于容栅编码器测量炮塔高精度动态转角的方法[J].应用光学,2013,34(1):25-28.  
Yu Xun, Ma Lin. A Method for Measuring the Dynamic Angle of Turret with High Accuracy Based on Capacitive Grating Encoder[J]. Applied Optics, 2013, 34(1): 25-28.
- [4] 陆雯,王道波.容栅传感器及其在目标运动转台中的应用[J].计算机仿真,2005,22(8):250-252.  
Lu Wen, Wang Daobo. Capacitive Grating Sensor and Its Application in Target Motion Table[J]. Computer Simulation, 2005, 22(8): 250-252.
- [5] 杨雪芳.全数字式容栅位移传感器[J].仪表技术与传感器,2005,7(1):33-37.  
Yang Xuefang. Full Digital Capacitive Displacement Sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2005, 7(1): 33-37.
- [6] 王安敏,王辛立,崔伟.基于AT89C52单片机的容栅传感器测距系统[J].仪表技术与传感器,2008(9):86-89.  
Wang Anmin, Wang Xinli, Cui Wei. A Capacitive Sensor Ranging System Based on AT89C52 Micro Controller[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(9): 86-89.
- [7] 徐科军,薛靓.容栅传感器鉴相型测量电路分析[J].计量技术,1995(6):7-8.  
Xu Kejun, Xue Liang. Analysis on Phase Detection Circuit of Capacitive Grating Sensor[J]. Measurement Technique, 1995(6): 7-8.

(责任编辑:申剑)