

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107447

# 基于二次调制的高精度多圈绝对式时栅角位移传感器\*

刘小康, 柳 康, 蒲红吉, 于治成, 彭 凯

(重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054)

**摘 要:**提出了一种基于二次调制的高精度多圈绝对式时栅角位移传感器,该传感器由单圈绝对式传感器与多圈计数模块组成。首先,采用两级单排式时栅角位移传感器构成单圈绝对式传感器,通过第一级传感器构建四路正交的行波信号,将差动的两路行波信号直接反射,作为精测信号;同时,利用第一级四路正交的行波信号作为第二级传感器的激励信号进行二次调制,获得整周单周期信号,作为粗测信号,精测信号结合粗测信号实现高精度单圈绝对式角位移测量。在此基础上,结合韦根多圈计数模块记录圈数信息,从而实现高精度多圈绝对式角位移测量。通过印制电路板技术制作了原理样机,搭建了实验平台,并进行了测试,实验结果表明:该传感器在整周范围原始精度可达 $\pm 8''$ ,并且在上电、断电情况下实现了圈数的准确记忆。

**关键词:** 二次调制;多圈绝对式;时栅;角位移传感器

中图分类号: TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

## High-precision multi-turn absolute time-grating angular displacement sensor based on re-modulation scheme

Liu Xiaokang, Liu Kang, Pu Hongji, Yu Zhicheng, Peng Kai

(Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** Presents a high precision multi-turn absolute time-grating angular displacement sensor, which is based on the re-modulation scheme. The sensor consists of a single-turn absolute sensor and a multi-turn counting module. Firstly, a two-stage single row time-grating angular displacement sensor is used to form a single-turn absolute sensor. Four orthogonal traveling wave signals are constructed through the first stage sensor. And two differential traveling wave signals are directly reflected as precise measurement signals. Meanwhile, the first four orthogonal traveling wave signal is utilized as the excitation signal of the second sensor for re-modulation to achieve the whole cycle single cycle signal, which is used as the rough measurement signal. The precise measurement signal is combined with the rough measurement signal to realize the high-precision single-turn absolute angular displacement measurement. On this basis, combined with Wiegand multi-turn counting module to record the turn number information, high-precision multi-turn absolute angular displacement measurement is realized. The principle prototype is made by PCB technology. The experimental platform is established, and the experiment is carried out. Experimental results show that the original accuracy of the sensor in the whole cycle range can reach  $\pm 8''$ . And the accurate memory of the number of turns is realized in the case of power on and power off.

**Keywords:** re-modulation scheme; multi-turn absolute type; time-grating; angular displacement sensor

## 0 引 言

随着科学技术的高度发展,精密角位移测量技术在

精密制造、自动化控制等领域扮演着越来越重要的角色<sup>[1-3]</sup>。高端数控机床的性能体现着一个国家的制造业水平,机床的精度主要由作为反馈的传感器决定<sup>[4]</sup>。角位移传感器可分为增量式、绝对式。与增量式角位移传

收稿日期:2021-01-27 Received Date: 2021-01-27

\* 基金项目:国家自然科学基金(51935004)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202001133)、“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020043)资助



传感器相比,绝对式角位移传感器上电即可输出绝对位置,断电后绝对位置不会丢失<sup>[4-5]</sup>。绝对式角位移传感器按量程分又可分为单圈绝对式与多圈绝对式角位移传感器。单圈绝对式角位移传感器只能测出 360°范围内的绝对角位置,而多圈绝对式角位移能够测出远超 360°的绝对角位置,可检测机床上滚珠丝杠类将旋转运动转换为直线运动时的位移,重新上电可输出直线运动的绝对位置<sup>[6-7]</sup>。单圈绝对式角位移传感器结合多圈计数模块可实现多圈绝对式角位移测量,而多圈绝对式角位移传感器的性能主要由单圈绝对式角位移传感器的性能决定,目前基于光学、电容原理的单圈绝对式角位移传感器发展最为迅速<sup>[8-9]</sup>。

在单圈绝对式传感器中,光栅角位移传感器以其分辨率高、精度高、寿命长等优点被广泛应用于高档数控机床<sup>[10]</sup>。绝对式光栅角位移传感器由精码道和粗码道组成,精码道是由一系列刻线组成,决定了光栅传感器的精度,粗码道是在整周进行无重复编码,实现光栅传感器的绝对定位。精码道刻线的密集程度决定了光栅角位移传感器的精度,但目前刻线的密集程度基本已经达到瓶颈,从制造上限制了光栅角位移传感器精度的提高<sup>[11]</sup>。而在进行粗码道设计时,除了要在 360°范围内无重复位置编码外,还要考虑编码的可扩展、易处理、容错等多方面因素,因此传感器的设计较为复杂<sup>[12-13]</sup>。除此之外,光栅角位移传感器对工作环境要求十分苛刻,在例如机械振动、极端温度变化或粉尘污染的环境下难以正常工作<sup>[14-15]</sup>。而基于电容耦合原理的电容式角位移传感器是通过测量电容器上的电信号来实现精密位移测量<sup>[16]</sup>,具有较高的分辨率和灵敏度,能够适应恶劣环境和实现非接触测量,并且还具有功耗低、结构简单、对机械结构装调要求低等特点<sup>[17]</sup>。电容式角位移传感器分辨率的提高与精度的提高相互矛盾,若要提高传感器的分辨率,就需要减小对极宽度,从而增加非线性响应,导致精度降低<sup>[18-19]</sup>。随着电容的分布电容和非线性问题逐渐得到抑制<sup>[20]</sup>,电容式角位移传感器具有很高的发展前景。

在多圈绝对式角位移传感器中,机械式、电子式、霍尔式、韦根式等多圈计数模块应用较广<sup>[6-7,21-22]</sup>。机械式多圈通过多级齿轮啮合实现圈数的记录,要提高圈数记录范围就要增加齿轮的传动比或者增加齿轮的数量,这样会导致体积增大,长期使用还会出现机械磨损,导致圈数信息偏移<sup>[6]</sup>。电子式多圈与霍尔式多圈则是对脉冲数进行记录,使用时需要外加圈数记录触发模块,导致体积增大,并且断电无法实现圈数的记录,若要实现断电记录,就要添加电池给内部芯片供电,因此需要不定时更换电池,操作不方便<sup>[7,21]</sup>。相比之下,基于“韦根效应”的韦根式多圈体积小、能实现非接触测量,并且无需外部供电,在突然断电的情况也能实现圈数的记录<sup>[22]</sup>。

本文前期已经提出了时栅位移测量方法<sup>[23-24]</sup>。当前时间量的测量精度比空间量的测量精度更高,通过时空转换原理将空间角位移量转化到时间量的测量中,从而获得高精度角位移。并且,由于电容式传感器自带积分滤波等特点,降低了传感器对制造的要求<sup>[19]</sup>。为此,本文通过单圈绝对式时栅角位移传感器结合韦根多圈计数模块,提出了一种基于二次调制的高精度多圈绝对式时栅角位移传感器。其中单圈绝对式传感器采用了三圈结构,外圈设计了反射环,将中间圈增量信号传输到反射环上,作为精测信号,由于信号只经过传递和耦合,最大程度的减少精测信号的损失,保证了高精度测量。同时,利用了二次调制方案,实现了中间圈传感部分与内圈传感部分空间信息的融合,产生了一个整周单周期信号,作为粗测信号,通过检测粗测信号的相位,实现传感器的绝对定位,无需复杂的编码解码过程。精测信号结合粗测信号从而实现高精度单圈绝对式角位移测量。精测信号与粗测信号分别经过反射与二次调制传到定尺上,实现了单边引线,使用时无需滑环,便于应用,并且精测部分与粗测部分共用了一组激励电极,结构更加紧凑,此外采用印制电路板技术(printed circuit board, PCB)制造传感片,制造简单,价格低廉。

## 1 单圈绝对式测量原理与结构设计

### 1.1 单圈绝对式精测原理

传感器由定子和转子组成,图 1 为单排式时栅角位移传感器测量原理图。定子上每 4 个扇环形激励电极为一组,在整周均匀的布置  $N$  组,每组激励电极对应的角度  $\theta_d = 360^\circ/N$ ,并对每组电极分别施加幅值相等,相位依次相差  $\pi/2$  的正弦交流激励:

$$\begin{cases} U_{IS+} = + A_m \sin(\omega t) \\ U_{IC+} = + A_m \cos(\omega t) \\ U_{IS-} = - A_m \sin(\omega t) \\ U_{IC-} = - A_m \cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $A_m$  为激励信号的幅值;  $\omega$  为激励信号的频率;  $t$  为时间。在动尺上均匀的布置  $N$  个双正弦感应电极,用来接收感应的行波信号。

传感器可看作变面积型电容传感器,感应信号  $U_{01}$  与电极正对面积变化  $\Delta S$  成正比<sup>[23]</sup>。用  $U_{S+}$ 、 $U_{C+}$ 、 $U_{S-}$ 、 $U_{C-}$  分别表示 4 组激励信号在同一个感应电极上的耦合信号,为了更好的理解单排式时栅角位移传感器的工作原理,这里只单独分析在一个对极内激励信号  $U_{IS+}$  对感应电极的影响,则  $U_{S+}$  可表示为:

$$U_{S+} = K_e \Delta S_{S+} U_{IS+} \quad (2)$$

式中:  $K_e$  为电场耦合系数;  $\Delta S_{S+}$  为施加  $U_{IS+}$  激励的电极

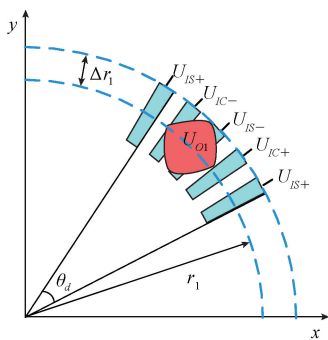


图1 电场式时栅测量原理

Fig. 1 Principle of electric field time-grating measurement

与定子电极正对面积的变化值。定子和转子发生相对转动时,定子和转子正对面积变化  $\Delta S_{S+}$  可表示为:

$$\Delta S_{S+} = 2r_1 \Delta r_1 [1 - \cos(N\pi\theta/180^\circ)] \theta \in [0^\circ, 360^\circ/N] \quad (3)$$

式中:  $r_1$  为双正弦电极所在的圆周半径;  $\Delta r_1$  为双正弦电极的幅值形式。由于传感器在每个对极变化时定子和转子的正对面积变化都可用式(3)表示,因此,传感器旋转的角度  $\theta$  扩展到  $360^\circ$  范围内。将式(1)和(3)带入式(2)可得  $U_{IS+}$  激励在感应电极上的耦合的信号为:

$$U_{S+} = 2K_e A_m r_1 \Delta r_1 [1 - \cos(N\pi\theta/180^\circ)] \sin(\omega t) \quad (4)$$

同理可分别得到激励信号  $U_{IC+}$ 、 $U_{IS-}$  和  $U_{IC-}$  在感应电极上的耦合信号  $U_{C+}$ 、 $U_{S-}$ 、 $U_{C-}$ 。传感器工作时,四路激励信号同时耦合到一片感应电极上,单个感应电极的总输

出信号是  $U_{S+}$ 、 $U_{C+}$ 、 $U_{S-}$ 、 $U_{C-}$  的叠加,最终精测信号  $U_{O1}$  可表示为:

$$U_{O1} = U_{S+} + U_{C+} + U_{S-} + U_{C-} = -4K_e A_m r_1 \Delta r_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) = K_1 \sin(\omega t - \alpha) \quad (5)$$

式中:  $K_1 = -4K_e A_m r_1 \Delta r_1$  是精测信号的幅值;  $\alpha = N\pi\theta/180^\circ$  是精测信号的相位。相位是与传感器对极数  $N$  成正比变化,传感器旋转一周,感应波形走  $N$  个周期。

电容式传感器易受到外界电磁场的干扰,因此,将传感器设计成差动结构,如图2(a)所示。两个感应电极在空间上相差  $3/2$  对极,因此感应信号相位相差  $3\pi$ 。此时,差动电极上感应信号  $U_{O2}$  可表示为:

$$U_{O2} = K_1 \sin(\omega t - \alpha - 3\pi) = -K_1 \sin(\omega t - \alpha) \quad (6)$$

假设干扰信号为  $U_E$ ,改进后精测信号  $U_{J0}$  可表示为:

$$U_{J0} = U_{O1} + U_E - (U_{O2} + U_E) = 2K_1 \sin(\omega t - \alpha) \quad (7)$$

因此,这种方式能有效消除共模干扰,并且传感器精测信号提高到原来的两倍。这种结构定子和转子上都需要引线,使用时转子上需要增加滑环,使用时不方便,因此,本文在此基础上设计了反射环结构,如图2(b)所示。在转子上将两个双正弦电极分别连接到转子内、外两圈反射环上。信号只经过传递和耦合的作用,最大程度的保留精测信号的精度水平,并且使得精测信号传递到定尺上,实现了单边引线。传感器工作时,在定尺上对反射环上的信号做差得到  $U_{J0}$  信号,将  $U_{J0}$  信号与参考信号进行比相,再进行高频时钟插补检测行波信号的相位,从而获得小于  $\theta_d$  的精确角位移。

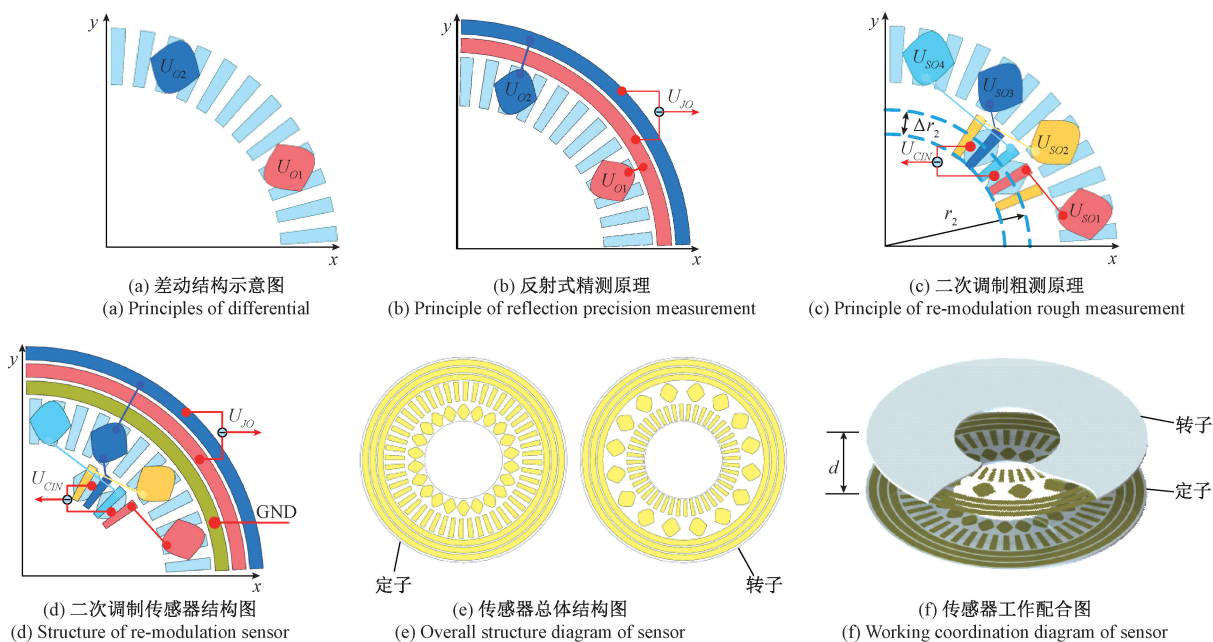


图2 基于二次调制的单圈绝对式时栅角位移传感器

Fig. 2 Single-turn absolute time-grating angular displacement sensor based on the re-modulation scheme

## 1.2 基于二次调制的单圈绝对式粗测原理

上文提到的单排式时栅传感器只能获得增量信号,无法在整周进行定位。本文通过二次调制获得整周单周期信号,通过该信号的相位进行绝对位置判断。在这里,重新定义上文提到的具有  $N$  对极的激励电极与感应电极分别叫做第一级激励电极与第一级感应电极。在此基础上,在传感器定子和转子内圈上分别添加一圈具有  $N-1$  对极的激励电极与感应电极,定义其分别为第二级激励电极与第二级感应电极。本文研究的二次调制方案如图 2(c) 所示,将具有  $N$  对极的第一级感应电极在每个对极依次偏移  $1/4$  对极,使其产生空间正交的 4 组感应信号。又将这 4 组感应信号分别接到第二级传感单元的激励电极上,第二级传感单元的感应电极通过电场耦合,从而得到第二级传感单元的感应信号。第一级传感部分的 4 个感应信号  $U_{s01}$ 、 $U_{s02}$ 、 $U_{s03}$ 、 $U_{s04}$  为别为:

$$\begin{cases} U_{s01} = K_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ - \pi/2 \times 0) \\ \quad = K_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) \\ U_{s02} = K_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ - \pi/2 \times 1) \\ \quad = -K_1 \cos(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) \\ U_{s03} = K_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ - \pi/2 \times 2) \\ \quad = -K_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) \\ U_{s04} = K_1 \sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ - \pi/2 \times 3) \\ \quad = K_1 \cos(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

从式(8)可知第一级感应信号  $U_{s01}$ 、 $U_{s02}$ 、 $U_{s03}$ 、 $U_{s04}$  的相位依次相差  $-\pi/2$ ,连接第一级感应电极与第二级激励电极后,第二级激励电极的信号为别为  $U_{s02}$ 、 $U_{s03}$ 、 $U_{s04}$ 、 $U_{s01}$ ,相位依次相差  $\pi/2$ 。此时第二级感应电极输出行波信号  $U_i$  可表示为:

$$\begin{aligned} U_i &= 2K_1 r_2 \Delta r_2 \{ [1 - \cos((N-1)\pi\theta/180^\circ)] \times \\ &\sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) - [1 + \sin((N-1)\pi\theta/180^\circ)] \times \\ &\cos(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) - [1 + \cos((N-1)\pi\theta/180^\circ)] \times \\ &\sin(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) + [1 - \sin((N-1)\pi\theta/180^\circ)] \times \\ &\cos(\omega t - N\pi\theta/180^\circ) \} \\ &= -4K_1 r_2 \Delta r_2 \sin(\omega t - \pi\theta/180^\circ) \\ &= K_2 \sin(\omega t - \beta) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $K_2 = -4K_1 r_2 \Delta r_2$ ,  $\beta = \pi\theta/180^\circ$  为粗测的相位,  $r_2$  为第二级感应电极中心所在的圆周半径;  $\Delta r_2$  为正弦电极的幅值形式。因此,通过将第一级输出信号作为第二级的激励信号,可将整周具有  $N$  周期信号与  $N-1$  周期信号融合成为整周单周期信号,通过检测该信号的相位可以获得传感器的绝对位置。同理,为了消除外界的干扰,也可将其做成差动结构,如图 2(c) 所示。最终的粗测信号  $U_{cIN}$  可表示为:

$$U_{cIN} = 2K_2 \sin(\omega t - \beta) \quad (10)$$

由于空间电场规律难寻,导致差动结构上的两个电极上的串扰有差异,上文提到的差动结构电极离的较近,电极上的串扰差异较小,并且差动结构使得测粗信号幅值提高了一倍,因此基于二次调制的单圈绝对式粗测原理对传感器定位能力的提高有重要意义。

## 1.3 单圈绝对式位移测量

经前期理论推导发现:激励引线会对反射环带来干扰,通过激励引线与反射环中间加屏蔽环可大幅度降低干扰,如图 2(d) 所示。传感器的总体结构如图 2(e) 所示,传感器的工作配合如图 2(f) 所示,定子和转子相互平行,同心配合,且之间的距离为  $d$ 。本文提出的绝对式角位移传感器有两个输出信号( $U_{j0}$  和  $U_{cIN}$ ),  $U_{j0}$  是直接反射得到的整周多周期信号,用于精测,保证了传感器的精度;  $U_{cIN}$  是由二次调制原理将两个通道多周期空间信号经过再调制产生的整周单周期信号,用于粗测,实现绝对位置判断。传感器精测部分结构设计成了  $N$  对极后,传感器在旋转一周的过程中可在感应信号中检测到  $N$  周期的行波信号,通过细分每个周期,可以测得小于  $\theta_d$  的角度。若二次调制原理产生的位移能够区分精测部分的精细位置所在的对极,即精测测量误差小于  $\theta_d$ ,则传感器能实现绝对定位。

图 3 为单圈绝对测量方法示意图,当传感器旋转到绝对位置  $\theta_p$  时,传感器的精测信号和粗测信号分别与参考信号进行比相,分别得到精测信号的相位  $\alpha$  与粗测信号的相位  $\beta$ ,由式(11)可以得到粗测部分相对于精测部分所在的周期  $n$ 。

$$n = \text{int}[N\beta/2\pi] \quad (11)$$

最终,传感器的绝对角位置  $\theta_p$  可以表示为:

$$\theta_p = 360^\circ/N \times n + 360^\circ/N \times \alpha/2\pi \quad (12)$$

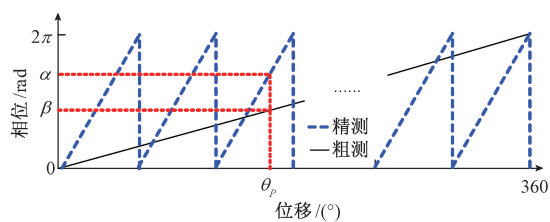


图 3 单圈绝对角位移测量方法

Fig. 3 Method of single-turn absolute angle measurement

图 4 为单圈绝对角度测量方法流程图。传感器上电之后,同时检测精测环节的相位  $\alpha$  与粗测环节的相位  $\beta$ ,将  $\beta$  带入式(11),得到粗测部分相对于精测部分所在的周期  $n$ ,再将  $\alpha$  与  $n$  带入式(12),最终得到绝对角位置  $\theta_p$ 。

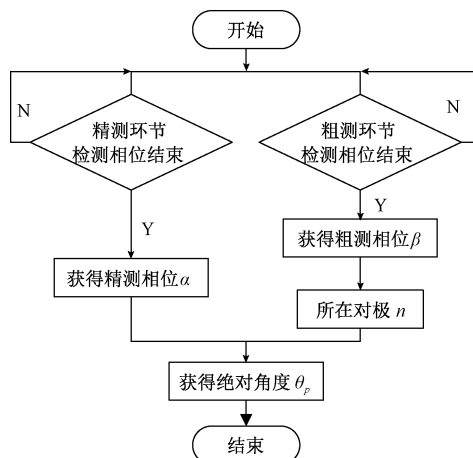


图4 单圈绝对测量流程

Fig. 4 Flow of single-turn absolute angle measurement

## 2 基于韦根的多圈实现方法

### 2.1 韦根效应与多圈计数原理

采用了 POSITAL 公司基于“韦根效应”推出的多圈计数模块与基于二次调制的单圈绝对式时栅角位移传感器相结合的方式,实现多圈绝对式测量。“韦根效应”是由美国物理学家 John R. Wiegand 于 1974 年发现的,韦根丝“核”与“壳”的磁感应方形可由外加磁场控制。韦根效应具体工作原理如图 5 所示,韦根丝上缠绕多匝线圈,当外部未施加磁场时韦根丝的“核”与“壳”的磁场方形相同,如图 5 中(I)所示,对外部施加反方向磁场,随着外部磁场的增大,韦根丝“核”的磁场发生改变,此时线圈的磁通量突然变化,产生一个能量巨大的尖峰电压,如图 5 中(II)所示,随着外部磁场的继续增大,韦根丝的“壳”的磁场方向也发生改变,产生一个较小的能量脉冲,如图 5 中(III)所示。同理,继续添加反方向磁场,线圈会继续产生能量巨大的尖峰电压与较小的能量脉冲,如图 5 中(IV-V)所示。产生的尖峰电压由线圈的匝数和外部磁场的强度控制,该能量可给瞬时型存储器件供电。

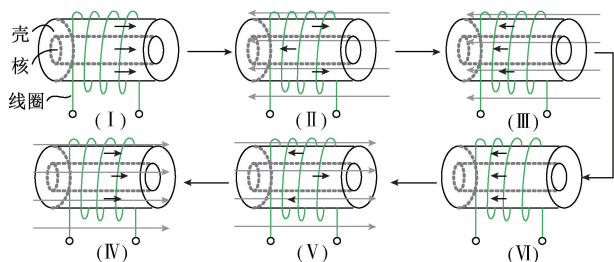


图5 韦根效应解析图

Fig. 5 Analytic diagram of Wiegand effect

多圈计数模块由韦根丝、线圈、永磁体、存储芯片和外围电路组成,具有以下特点:1)非接触式电磁采集,无机械磨损;2)磁场变化触发的能量脉冲足以后续存储芯片供电,并且脉冲能量恒定,使用时无需外部供电。

### 2.2 多圈绝对式的实现

本文提到的基于二次调制的单圈绝对式时栅角位移传感器具有功耗低、精度高、非接触测量等特点,传感器与多圈计数模块都采用 PCB 工艺,具有良好的接口。结合各自的优点,可实现高精度单圈绝对式角位移测量,如图 6 所示。上电后同时查询多圈计数模块存储器里的圈数信息和获取传感器当前绝对位置,并同时输出圈数值与单圈绝对角位移值。

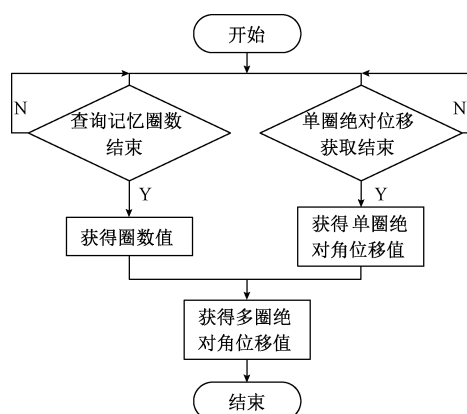


图6 多圈绝对测量流程

Fig. 6 Flow of multi-turn absolute angle measurement

## 3 实验系统设计

### 3.1 传感器样机设计与实验平台搭建

为了验证所提出的传感器的性能,采用 PCB 工艺制作了外径 83 mm、内径 34 mm 的原理样机,原理样机的中间圈对极数  $N$  设计成 72 对极,内圈对极数  $N-1$  设计成 71 对极。搭建了如图 7 所示的实验平台,该平台使用了英国 RPI 公司的 AP300 精密气浮转台,在  $360^\circ$  范围内能实现  $\pm 0.5''$  的定位精度。传感器、信号处理板、多圈计数模块安装到机械工装上,由工控机控制、显示转台的位置信息,由信号处理板采集多圈绝对位置信息,上位机进行显示。安装时保证定子、转子、转台 3 者同心,定子和转子相对平行,间隙为 0.3 mm。

### 3.2 测量系统设计

图 8 为传感器信号处理过程。由现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)的数字信号发生器模块产生 4 路相位依次相差  $\pi/2$  的激励信号,经过放大电路后传输到第一级激励电极上,由精测部分和基于



图 7 实验平台

Fig. 7 Experiment platform

二次调制的粗测部分可分别获得多周期精细信号  $U_{J0}$  与单周期粗测信号  $U_{CIN}$ 。  $U_{J0}$  和  $U_{CIN}$  信号分别经过放大、滤波、整形等操作获得方波信号,在 FPGA 内与参考信号进行比较,再由高频时钟插补模块以及信号处理模块获得精测信号相位  $\alpha$  以及粗测信号相位  $\beta$ ,由机械角度计算模块计算出时栅角位移的绝对位置  $\theta_p$ ,并将其发送到多圈绝对式计算模块,通过该模块与多圈计数模块通信,获取多圈值,将多圈值与单圈绝对位置信息发送到 BISS-C 发送模块,通过该模块实现传感器与其他设备的交互。

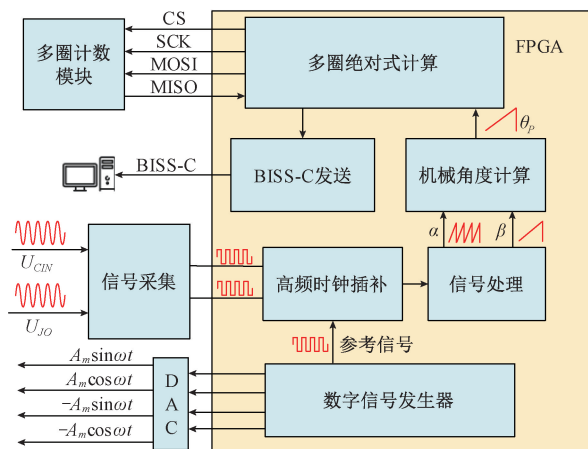


图 8 信号处理过程

Fig. 8 Signal processing

### 4 实验结果分析与优化

#### 4.1 单圈绝对实验结果

传感器单圈绝对精度由精测部分决定,首先进行精测实验。精测部分整周误差峰峰值为  $16''$ ,如图 9 所示。图 10(a) 给出了精测部分一个对极内 ( $0^\circ \sim 5^\circ$ ) 的误差数据,相对应的误差频谱如图 10(b) 所示,可以看出传感器对极内误差峰峰值为  $14''$ ,其中四次误差占主要成分。

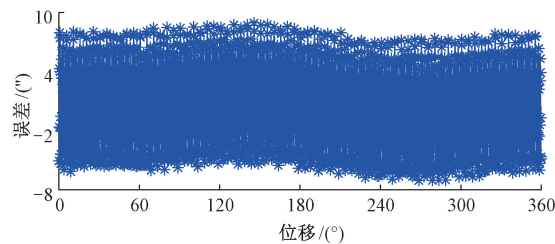


图 9 精测部分整周误差曲线

Fig. 9 Error curve of full range of precise measurement

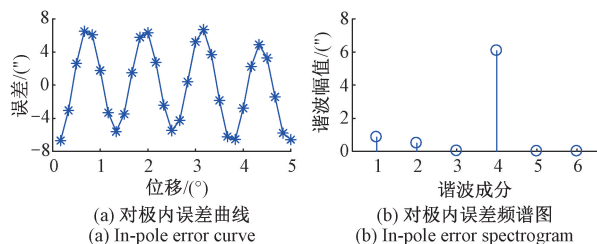


图 10 精测部分对极内误差

Fig. 10 Error of in-pole of precise measurement

其次进行基于二次调制的粗测实验。本文精测部分对极数设计成 72 对极,当粗测部分整周误差小于  $18\ 000''$  时,传感器能够实现绝对定位。图 11 为传感器粗测部分整周误差,其中误差的峰峰值为  $8\ 020''$ ,小于  $18\ 000''$ 。因此粗测部分很容易区分所在对极  $n$ ,并且输出传感器绝对角位移值。

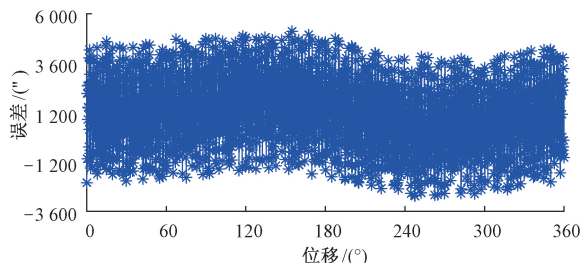


图 11 粗测部分整周误差曲线

Fig. 11 Error curve of full range of rough measurement

#### 4.2 多圈绝对实验结果

传感器的多圈精度由单圈绝对传感器决定,由多圈计数模块保证圈数的记忆。因此,在  $1\text{ r/min}$  的情况下测量传感器圈数记忆情况,结果如图 12 所示。表明了在上电情况下多圈传感器能有效的输出多圈绝对位置。

在正常使用时可能会遇到突发断电情况,韦根多圈计数模块可实现无源计数,因此在断电情况下每转 10 圈再上电读取一次圈数信息,观察圈数丢失情况,结果如图 13 所示。表明了断电情况下多圈传感器仍能有效的记录圈数信息。

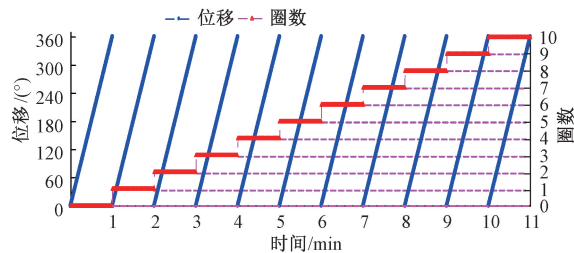


图 12 上电圈数累计测试曲线

Fig. 12 Cumulative test curve of turns under power on condition

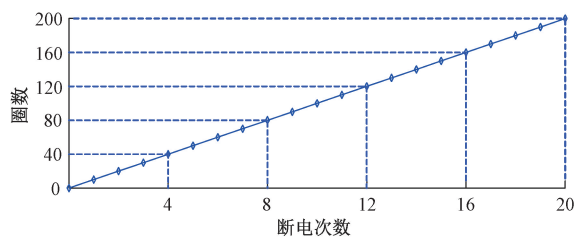


图 13 断电圈数累计测试曲线

Fig. 13 Cumulative test curve of turns under power off condition

## 5 结 论

本文提出了一种基于二次调制的高精度多圈绝对式时栅角位移传感器。该传感器由基于二次调制的单圈绝对式时栅角位移传感器结合韦根多圈计数模块实现了高精度多圈绝对式角位移测量。通过 PCB 技术制作了原理样机,搭建了实验平台,对多圈绝对式时栅角位移传感器进行测试,得出了以下结论:

1) 在单排式时栅角位移传感器的基础上采用了反射环的结构,最大程度的减少了精测信号的损失,又结合差动结构,消除了共模干扰,使精测信号提高了一倍,最终传感器在整周范围内原始精度可达 $\pm 8''$ ;

2) 从理论上推导了将第一级感应信号作为第二级激励信号进行二次调制,可实现空间上  $N$  与  $N-1$  对极通道信号的融合,并产生整周单周期信号,经实验验证,传感器在整周范围内能实现绝对定位;

3) 结合基于二次调制的单圈绝对式时栅角位移传感器的高精度的特点与韦根多圈计数模块的无源计数的功能,实现了高精度多圈绝对式角位移测量,实验表明了该传感器在上电、断电情况下都能准确记录圈数。

综上,该多圈绝对式传感器具有很好的应用前景。

## 参考文献

[1] 周亮,王振环,孙东晨,等. 现代精密测量技术现状

及发展[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1869-1878.

ZHOU L, WANG ZH H, SUN D CH, et al. Present situation and development of modern precision measurement technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1869-1878.

[2] BAO H Q, XU J W, L Y, et al. Aviation-oriented micromachining technology—micro-ECM in pure water [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(2008): 455-461.

[3] 王磊杰,张鸣,朱煜,等. 扫描干涉光刻机的超精密移相锁定系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1765-1773.

WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, et al. Present situation and development of modern precision measurement technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 38(8): 1869-1878.

[4] ZHANG Z, DONG Y, NI F, et al. A method for measurement of absolute angular position and application in a novel electromagnetic encoder system [J]. Journal of Sensors, 2015(2): 1-10.

[5] 赵长海,万秋华,梁立辉,等. 小型高精度航天级光电编码器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015(8): 1224-1230.

ZHAO CH H, WAN Q H, LIANG L H, et al. The small high-precision spaceborne photoelectric encoder [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015(8): 1224-1230.

[6] 赵志巍. 一种绝对式三轴联动多圈编码器的研制[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(1): 8-10.

ZHAO ZH W. Development of an absolute three axes linkage multiloop encoder [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2009, 32(1): 8-10.

[7] 张从鹏,徐兵,徐宏海. 基于STM32的高精度多圈绝对角度传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2014(12): 13-14+28.

ZHANG C P, XU B, XU H H. High precision multi-circle absolute displacement sensor based on STM32 [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014, (12): 13-14+28.

[8] 高文政,崔小强. 电容式旋转编码器设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(2): 69-75.

GAO W ZH, CUI X Q. Design of capacitive rotary encoder [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(2): 69-75.



- [9] ZHANG Z, DONG Y, NI F, et al. A method for measurement of absolute angular position and application in a novel electromagnetic encoder system[J]. *Journal of Sensors*, 2015, 2015(2):1-10.
- [10] 冯英翹, 万秋华, 孙熒, 等. 小型光电轴的高分辨率细分技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1825-1829.
- FENG Y Q, WAN Q H, SUN Y, et al. High resolution interpolation techniques of small photoelectric encoder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1825-1829.
- [11] 高旭, 李舒航, 马庆林. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 741-752.
- GAO X, LI SHU H, MA Q L. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741-752.
- [12] 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(11): 2459-2464.
- FENG CH P, ZHU L Q, PAN ZH K, et al. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11): 2459-2464.
- [13] 韩旭东, 徐新行, 刘长顺, 等. 用于星载激光通信终端的绝对式光电角度编码器[J]. *光学与精密工程*, 2016, 24(10): 2424-2431.
- HAN X D, XU X X, LIU CH SH, et al. Absolute optical angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2424-2431.
- [14] SHI Y P, NI K, LI X H, et al. Highly accurate, absolute optical encoder using a hybrid-positioning method[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5258-5261.
- [15] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 379-386.
- WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 379-386.
- [16] 焦扬, 黄明, 刘品宽, 等. 双角度编码器超精密转台测角误差校准[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(10): 2180-2191.
- JIAO Y, HUANG M, LIU P K, et al. Calibration of angular errors of high-precision rotary table with two-angle encoders[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2180-2191.
- [17] 谢锐, 马铁华, 武耀艳, 等. 嵌入式容栅传感技术及轴功率测试研究[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(4): 844-849.
- XIE R, MA T H, WU Y Y, et al. Study on embedded capacitive grating sensing technology and shaft power testing[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 844-849.
- [18] HOU B, BIN ZH, YI L Y, et al. High-precision incremental capacitive angle encoder developed by micro fabrication technology [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, DOI: 10.1109/TIE. 2020. 2992954.
- [19] PENG K, YU ZH CH, LIU X K, et al. Features of capacitive displacement sensing that provide high-accuracy measurements with reduced manufacturing precision [J]. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 2017, 9(64): 7377-7386.
- [20] 曲咏哲, 李玉山, 丁同浩, 等. 高速 PCB 上同步开关噪声抑制的多级电容法[J]. *电子科技大学学报*, 2013, 42(2): 229-233.
- QU Y ZH, LI Y SH, DING T H, et al. Method for the suppression of simultaneous switching noise with multi-stage capacitors in high-speed PCB [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(2): 229-233.
- [21] 周秀, 牛勃, 马飞越, 等. 基于 TLE5012B 的多圈绝对角度传感器设计[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(11): 90-92+95.
- ZHOU X, NIU B, MA F Y, et al. Design of multi-circle absolute angular sensor based on TLE5012B [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017, 36(11): 90-92+95.
- [22] 安跃军, 闵家龙, 师勇, 等. 韦根传感器在无刷直流电机中的应用[J]. *沈阳工业大学学报*, 2014, 36(3): 241-245.
- AN Y J, MIN J L, SHI Y, et al. Application of wiegand sensor in brushless direct current motor[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014, 36(3): 241-245.
- [23] 彭凯, 于治成, 刘小康, 等. 单排差动结构的新型纳米时栅位移传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(3): 734-740.
- PENG K, YU ZH CH, LIU X K, et al. Novel nanometer time-grating displacement sensor with single row differential structure [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3): 734-740.
- [24] 刘小康, 李昌伟, 彭凯, 等. 基于分时复用反射电极





结构的高精度绝对式时栅角位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 23-31.

LIU X K, LI CH W, PENG K, et al. High precision absolute time-grating angular displacement sensor using time division multiplex access scheme with reflective electrode structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 23-31.

### 作者简介



**刘小康**, 1999、2002 和 2005 年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位, 2008 年于合肥工业大学仪器科学与技术博士后流动站出站, 现为重庆理工大学教授、北京理工大学博士生导师, 主要研究方向为智能仪器与传感器。

E-mail: lxx@cqut.edu.cn

**Liu Xiaokang** received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Chongqing University in 1999, 2002 and 2005, respectively. He finished his postdoctoral research at Hefei University of Technology in 2008. He is currently a professor at Chongqing University of Technology and a Ph. D. advisor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensor.



**柳康**, 2018 年于安徽科技学院获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为智能仪器与传感器。

E-mail: liukang950813@163.com

**Liu Kang** received his B. Sc. degree from Anhui Science and Technology University in 2018. He is currently pursuing his M. Sc. degree at Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensor.



**蒲红吉** (通信作者), 2011 年于重庆理工大学获得学士学位, 2014 年于重庆理工大学获得硕士学位, 2020 年于西安交通大学获得博士学位, 现为重庆理工大学助理研究员, 主要研究方向为嵌入技术与智能仪器。

E-mail: phongji@126.com

**Pu Hongji** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing University of Technology in 2011 and 2014, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2020. He is currently an assistant research fellow at Chongqing University of Technology. His main research interests include embedded technology and intelligent instrumentation.