

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210808

基于二次调制原理的多层结构绝对式角位移传感器*

刘小康,康成莹,于治成,郑方燕,王合文

(重庆理工大学机械检测与装备技术教育部工程研究中心 重庆 400054)

摘要:为了在传感器径向尺寸不变的前提下,保持良好的测量精度和分辨率,以适应小型化需要的工业场合,提出了一种利用多层结构实现信号二次调制的圆时栅角位移传感器。传感器为3层结构,利用轴向空间,使内外环分别通过多层结构完成信号的二次调制,其中内环作为粗测环经二次调制后用于实现传感器的绝对定位,外环作为精测环经二次调制后,提高了传感器分辨率。采用PCB工艺制造了外径 $\Phi=100$ mm,内径 $\Phi=50$ mm的传感器样机,初步实验表明内外环同时施加激励时,内外环将分别受到对方产生的串扰影响,因此进一步提出分时施加激励的优化方法避免信号串扰的影响以提升测量精度。最终实验结果表明传感器能够实现绝对定位且分辨率提升了1倍,原始测量精度达到了 $\pm 4.1''$ 。

关键词:角位移传感器;多层结构;二次调制;绝对式;分时结构

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

Multilayer absolute angular displacement sensor based on the re-modulation method

Liu Xiaokang, Kang Chengying, Yu Zhicheng, Zheng Fangyan, Wang Hewen

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

Abstract: To meet the industrial needs of miniaturization and maintain favorable precision and resolution, a circular time-grating angular displacement sensor is proposed by using multi-layer structure and re-modulation scheme. The sensor is a three-layer structure. Its inner and outer rings complete the re-modulation of the signal through the multi-layer structure by using the axial space. The inner ring is used as the rough measurement part to realize the absolute positioning and the outer ring through re-modulation is used as the fine measurement part to improve the resolution of the sensor. A prototype sensor with an outer diameter of $\Phi=100$ mm and an inner diameter of $\Phi=50$ mm is manufactured by PCB technology. Preliminary experiments show that when the inner and outer rings are excited at the same time, the inner and outer rings are affected by the crosstalk generated by each other. Therefore, a time division method is further proposed to avoid the influence of signal crosstalk to improve the measurement accuracy. The final experimental results show that the sensor can achieve absolute positioning and the resolution of the fine measurement part is doubled, and the original measurement accuracy reaches $\pm 4.1''$.

Keywords: angular encoder; multilayer structure; re-modulation scheme; time division structure; absolute type

0 引 言

制造业是我国经济“创新驱动、转型升级”的主战场,“中国制造2025”以及“工业4.0”的实现需要精密检测技术的发展与支持^[1-3]。精密角位移测量装置作为核

心零部件在半导体、航天军工、机器人、数控机床等高端制造领域发挥着重要作用^[4-7]。

光栅角位移测量技术应用广泛,各研究单位为提高光栅的精度与分辨率对光栅的绝对编码技术、光栅制造技术、细分技术等方面进行了细致深入的研究^[8]。绝对式光栅编码技术可分为多码道编码技术、双码道编码技

收稿日期:2022-11-30 Received Date: 2022-11-30

* 基金项目:国家自然科学基金(51935004,52125503)、重庆市教委“成渝地区双城经济圈建设”科技创新项目(KJCX2020043)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202001133)、重庆理工大学科研创新团队项目(2023TDZ008)资助

术以及单码道编码技术,多码道编码方式的出现意味着位移测量由增量式向绝对式转变,但其相较于双码道和单码道编码不利于传感器小型化,结构更加复杂,因此,相关研究重点多集中于双码道和单码道编码技术^[9-11]。高密度的编码需要高密度、高一致性的栅线刻划,增加栅极密度是提升光栅精度与分辨率最直接的方法。栅线制造主要有机械刻线技术和光学蚀刻技术两种,机械刻线技术可制造小栅距的光栅,但耗时长,无法实现大规模的生产,其与纳米滚压印技术相结合可实现产业化生产,却难以保证刻线的一致性^[12]。光学蚀刻技术可制造出高精度、细间距的栅线,在早期此种技术限制了光栅尺寸,研究人员通过可移动的曝光源等复杂工艺使其适用于大尺寸、高密度的栅线制造,其制造成本和时间成本也大幅提高^[13-15]。受制于光学特性、工艺特性、制造成本等限制,并不能无限减小栅线栅距以提高光栅的精度和分辨率,因此研究人员还通过电气插值和光学插值等细分方法提高光栅分辨率^[16-17]。总体而言,光栅发展成熟、精度高,海德汉公司生产的RCN8000系列圆光栅系统精度已达到 $\pm 1''$,但存在制造成本高,编码技术复杂,光学物理特性限制精度和分辨率进一步提高等复杂因素。

电容式编码器相较于光栅具有易于制造、功耗低的优点,在测量中对位移变化有着出色的敏感性^[18-19]。目前实用的容栅位移测量系统多采用调相型,其不需要类似于光栅进行高精度、高密度的栅线刻划,使得成本大幅降低。清华大学的Hou等^[20]提出了一种由不同形状电极构成的电容式角编码器,通过对耦合电极形状的优化设计,使其精度达到 0.0036° 。电容式角编码器可通过精测与粗测结合等结构实现绝对定位,整体而言,电容式角编码器的精度较光栅还存在一定差距,边缘效应、寄生电容制约了其测量精度和分辨率进一步的提高,随着容栅的不断发展,上述问题也在不断地改善中^[21]。本人所在研究团队提出了一种电场式时栅测量方法,采用栅面传感,避免了细密栅线刻划,相较于光栅大幅降低了制造和生产成本,具有容栅结构简单、位移敏感性高的优点。此外,其很好的利用了电容滤波效应的优点,较好地抑制了寄生电容影响^[22-23]。

为了在传感器径向尺寸不变前提下,提高传感器的测量精度和分辨率,提出了一种基于二次调制原理且采用多层结构的绝对式时栅角位移传感器。传感器为3层结构,利用传感器轴向空间,实现了多层结构与二次调制原理的结合。通过对传感器内外环分时施加激励,内外环经过二次调制分别产生粗测感应信号与精测感应信号。内环粗测环实现了绝对定位,外环精测环经二次调制后分辨率提升了1倍,分时方法则避免了信号串扰影响,减小了寄生电容,进一步提高了测量精度。

1 电场式圆时栅测量原理

电场式圆时栅采用四路交变电场进行电场耦合将空间角位移变化转化为电场信号在相位上的移动,从而实现对接角度的测量,如图1(a)所示为增量圆时栅传感器的结构示意图。

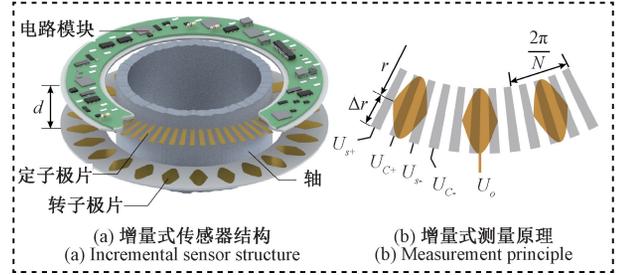


图1 增量式时栅传感器测量原理

Fig. 1 Principle of the incremental time-grating sensor

传感器为双层结构,包括定子、转子、电路处理模块3部分,定子上覆有单列的环扇形激励电极,将4片激励电极称为一个对极,在圆周上均布 N 个对极,则每个对极空间角度为 $2\pi/N$ 。对应的转子上覆有 N 个双正弦型的感应电极,定子与转子正对平行安装,转子可绕轴心相对转动。

传感器转子转动时,可视作变面积的平板电容。如图1(b)所示,对激励电极施加幅值、周期相等,相邻相位相差 $\pi/2$ 的正弦交流激励:

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

式中: A_m 为激励信号的幅值; ω 为激励信号的频率; t 为时间。同一个对极内单个激励电极在转子对应感应电极产生的感应信号受施加的激励 U_i 及定转子极片正对面积 ΔS_i 影响,可表示为:

$$U_{oi} = K_e \Delta S_i U_i \quad (2)$$

式中: K_e 为电场耦合系数; ΔS_i 为激励电极与感应电极的正对面积; U_i 为施加到激励电极的激励。

当转子绕轴心转动时, ΔS_i 为转动角 θ 的函数,以施加激励信号为 U_{s+} 的激励极片与感应极片的正对面积 ΔS_{s+} 为例,当转子转动时,其面积变化形式为:

$$\Delta S_{s+} = 2r\Delta r [1 - \cos(N\theta)] \quad (3)$$

式中: r 为转子上双正弦电极所在的圆周半径; Δr 为双正弦形电极的幅值形式。同理可分别得到 ΔS_{c+} 、 ΔS_{s-} 、 ΔS_{c-} 。将 ΔS_i 与式(1)代入式(2)可以得到4片激励电

极在感应电极上产生的感应信号:

$$\begin{cases} U_{0_{s+}} = 2K_e A_m r \Delta r [1 - \cos(N\theta)] \sin(\omega t) \\ U_{0_{c+}} = 2K_e A_m r \Delta r [1 + \sin(N\theta)] \cos(\omega t) \\ U_{0_{s-}} = -2K_e A_m r \Delta r [1 + \cos(N\theta)] \sin(\omega t) \\ U_{0_{c-}} = -2K_e A_m r \Delta r [1 - \sin(N\theta)] \cos(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

将同一个对极内四路激励电极在单个感应电极产生的感应信号叠加,则单个感应电极上得到的最终感应信号为:

$$U_o = U_{os+} + U_{oc+} + U_{os-} + U_{oc-} - 4K_e A_m r \Delta r \sin(\omega t - N\theta) = K \sin(\omega t - N\theta) \quad (5)$$

式中: $K = -4K_e A_m r \Delta r$ 为感应信号的幅值; $N\theta$ 为感应信号的相位形式。如图1(b)所示,感应电极按照一个对极宽度的间隔进行圆周阵列均布,使得感应电极在空间分布上两两相位相差 2π ,则相邻感应电极产生的感应信号相位相差 2π ,每个感应电极得到的感应信号均为 $K \sin(\omega t - N\theta)$,将所有感应电极串联从而得到最终的感应信号。

增量电场式圆时栅传感器将空间中转动角度 θ 转化为信号上相位的变化,对相位进行测量可得到传感器的位移值,实现角度测量,但无法实现绝对定位,且增加传

感器分辨率和精度依赖于对极数增加,从而增大了传感器的径向尺寸,不利于小型化。

2 基于二次调制的绝对式编码器测量原理

2.1 多层结构设计

多层圆时栅传感器为3层结构,通过内外环的精测环与粗测环实现绝对定位,并通过利用轴向空间实现信号二次调制,提升传感器的分辨率和测量精度。图2(a)为传感器整体示意图,顶层为定子I,底层为定子II,中间层为转子,转子分为A、B两面,其通过内部引线将A、B两面电极进行连接。图2(b)所示为传感器信号流向示意图,定子I内外环与转子A面内外环分别耦合产生第一级内环粗测感应信号与第一级外环精测感应信号,将第一级感应信号作为激励信号通过内部引线并按照一定顺序施加到转子B面内外环并与底层定子II内外环耦合实现二次调制得到第二级内环粗测感应信号和第二级外环精测感应信号。

图2(c)所示为定子I、定子II以及转子的栅面结构示意图,定子I上覆有两列激励电极分别为第一级内环

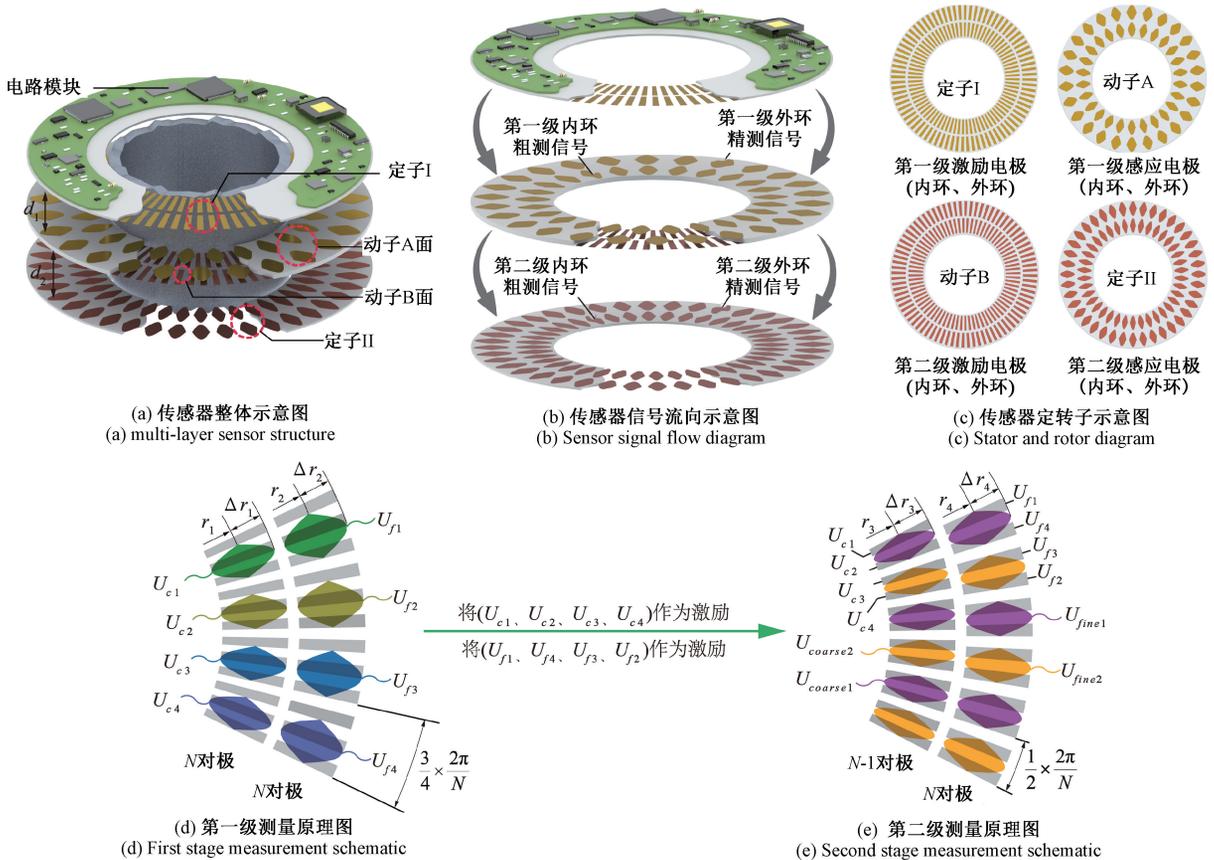


图2 多层传感器结构示意图

Fig. 2 Structure of the multi-layer sensor

激励电极和第一级外环激励电极,均为 N 对极;转子 A 面覆有两列感应电极分别为第一级内环感应电极和第一级外环感应电极;转子 B 面覆有两列激励电极称为第二级内环激励电极和第二级外环激励电极,其中内环设为 $N-1$ 对极,外环设为 N 对极;定子 II 覆有两列感应电极称为第二级内环感应电极和第二级外环感应电极。

传感器工作时,定子与转子平行正对安装,定子 I、II 固定,转子可绕轴心相对转动。传感器通过利用轴向空间完成信号的二次调制,传感器内环得到实现绝对定位的第二级粗测感应信号,外环得到分辨率翻倍的第二级精测感应信号。

2.2 传感器二次调制实现原理

传感器在增量式的基础上通过多层结构实现信号的二次调制,从而提高传感器的分辨率,如图 2(d) 所示为第一级耦合的原理,第一级内外环激励电极均为 N 对极,在第一级对转子 A 面内外环的双正弦感应电极,按照 $3/4$ 对极宽度在圆周上均布感应电极极片,则相邻四片感应电极上得到的感应信号相位将会依次相差 $3/4 \times 2\pi = 3\pi/2$ 即 $-\pi/2$,结合前文公式,将同空间相位的感应极片串联可得到内外环第一级粗测信号与精测信号分别为:

$$\begin{cases} U_{c1} = -4K_e A_m r_1 \Delta r_1 \sin(\omega t - N\theta) = \\ \quad K_1 \sin(\omega t - N\theta) \\ U_{c2} = -4K_e A_m r_1 \Delta r_1 \sin(\omega t - N\theta - \pi/2) = \\ \quad -K_1 \cos(\omega t - N\theta) \\ U_{c3} = -4K_e A_m r_1 \Delta r_1 \sin(\omega t - N\theta - \pi) = \\ \quad -K_1 \sin(\omega t - N\theta) \\ U_{c4} = -4K_e A_m r_1 \Delta r_1 \sin(\omega t - N\theta - 3\pi/2) = \\ \quad K_1 \cos(\omega t - N\theta) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} U_{f1} = -4K_e A_m r_2 \Delta r_2 \sin(\omega t - N\theta) = \\ \quad K_2 \sin(\omega t - N\theta) \\ U_{f2} = -4K_e A_m r_2 \Delta r_2 \sin(\omega t - N\theta - \pi/2) = \\ \quad -K_2 \cos(\omega t - N\theta) \\ U_{f3} = -4K_e A_m r_2 \Delta r_2 \sin(\omega t - N\theta - \pi) = \\ \quad -K_2 \sin(\omega t - N\theta) \\ U_{f4} = -4K_e A_m r_2 \Delta r_2 \sin(\omega t - N\theta - 3\pi/2) = \\ \quad K_2 \cos(\omega t - N\theta) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $K_1 = -4K_e A_m r_1 \Delta r_1$ 为第一级内环粗测感应信号的幅值; $K_2 = -4K_e A_m r_2 \Delta r_2$ 为第一级外环精测感应信号的幅值; $N\theta$ 为第一级粗测信号和精测信号的相位。第一级粗测信号与第一级精测信号满足作为传感器激励信号四路幅值两两相差 $\pi/2$ 的条件,可以作为第二级的激励信号从而实现二次调制。

如图 2(e) 所示,将第一级内环粗测感应信号按照相邻相位相差 $-\pi/2$ 即 U_{c1} 、 U_{c2} 、 U_{c3} 、 U_{c4} 的顺序施加到转子

B 面内环 $N-1$ 个对极的激励电极上;将第一级外环精测信号作为激励信号按照相邻相位相差 $\pi/2$ 即 U_{f1} 、 U_{f2} 、 U_{f3} 、 U_{f4} 的顺序施加到转子 B 面外环 N 个对极的激励电极上。根据式(2)~(5),可得到最终的粗测感应信号与精测感应信号分别为:

$$\begin{aligned} U_{course} &= K_1 \sin(\omega t - N\theta) \times 2r_3 \Delta r_3 [1 - \cos(N-1)\theta] - \\ &K_1 \cos(\omega t - N\theta) \times 2r_3 \Delta r_3 [1 + \sin(N-1)\theta] - \\ &K_1 \sin(\omega t - N\theta) \times 2r_3 \Delta r_3 [1 + \cos(N-1)\theta] + \\ &K_1 \cos(\omega t - N\theta) \times 2r_3 \Delta r_3 [1 - \sin(N-1)\theta] = \\ &-4K_1 r_3 \Delta r_3 \sin(\omega t - \theta) = K_{course} \sin(\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} U_{fine} &= K_2 \sin(\omega t - N\theta) \times 2r_4 \Delta r_4 (1 - \cos N\theta) + \\ &K_2 \cos(\omega t - N\theta) \times 2r_4 \Delta r_4 (1 + \sin N\theta) - \\ &K_2 \sin(\omega t - N\theta) \times 2r_4 \Delta r_4 (1 + \cos N\theta) - \\ &K_2 \cos(\omega t - N\theta) \times 2r_4 \Delta r_4 (1 - \sin N\theta) = \\ &-4K_2 r_4 \Delta r_4 \sin(\omega t - 2N\theta) = K_{fine} \sin(\omega t - 2N\theta) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $K_{course} = -4K_1 r_3 \Delta r_3$ 为第二级粗测感应信号的幅值; $K_{fine} = -4K_2 r_4 \Delta r_4$ 为第二级精测感应信号的幅值; θ 为粗测信号的相位角; $2N\theta$ 为精测信号的相位角。

对比式(8)与(6),粗测信号经二次调制,对极数等效于 1,用于整周范围内粗测以实现绝对定位。对比式(9)与(7),精测信号通过二次调制,融合了传感器外环第一级与第二级的位置信息,在未增加传感器径向尺寸前提下,传感器对极数由 N 增加到 $2N$,使得传感器的分辨率对应提升了一倍,测量精度得到提高。

为了提升传感器抗干扰能力,进一步将定子 II 第二级内外环感应电极采取差动结构,以外环为例,感应电极按照 $1/2$ 对极宽度在圆周上均布感应电极极片,则相邻两片感应电极上得到的感应信号相位将会依次相差 $1/2 \times 2\pi = \pi$,即:

$$\begin{cases} U_{fine1} = K_{fine} \sin(\omega t - 2N\theta) \\ U_{fine2} = K_{fine} \sin(\omega t - 2N\theta + \pi) = \\ \quad -K_{fine} \sin(\omega t - 2N\theta) \end{cases} \quad (10)$$

假设干扰信号为 U_E ,差动结构改进后在信号处理电路中进行相减:

$$\begin{aligned} U_{fine} &= U_{fine1} + U_E - (U_{fine2} + U_E) = \\ &2K_{fine} \sin(\omega t - 2N\theta) \end{aligned} \quad (11)$$

差动结构可以有效消除外界的共模干扰信号。

2.3 传感器绝对定位实现

图 3 所示为传感器绝对定位测量示意图,由式(9)可知,得益于二次调制,传感器精测信号表达式中相位角为 $2N\theta$,转子每转动 π/N 的角度,传感器精测信号相位 φ 相移 2π ,如图 3 所示可表示为周期为 π/N 的函数:

$$\begin{cases} \varphi(\theta) = 2N\theta, & \theta \in [0, \pi/N] \\ \varphi(\theta) = \varphi\left(\theta + \frac{\pi}{N}\right), & \theta \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (12)$$

传感器粗测部分经过调制对极数相当于1,相位角为 θ ,当传感器相对转动角度 $\theta \in [0, 2\pi]$ 时,对应信号相位移动范围为 $\Phi \in [0, 2\pi]$,如图3所示有如下关系:

$$\Phi(\theta) = \theta, \theta \in [0, 2\pi] \quad (13)$$

若粗测部分测量的角位移的误差小于精测部分调制后单个对极对应的角度即 π/N ,则粗测部分可以识别精测部分当前所处的对极位置以实现绝对定位,传感器输出的角度值可表示为:

$$\theta_{out} = \theta_{coarse} + \theta_{fine} = \frac{\pi}{N} \text{int}\left(\frac{\Phi}{\pi/N}\right) + \frac{\varphi}{2N} \quad (14)$$

式中: $\theta_{coarse} = \frac{\pi}{N} \text{int}\left(\frac{\Phi}{\pi/N}\right)$ 表示粗测信号测得的传感器转过的整数个对极; $\theta_{fine} = \frac{\varphi}{2N}$ 表示当前对极内精测角度;传感器通过粗测部分和精测部分实现了传感器的绝对定位。

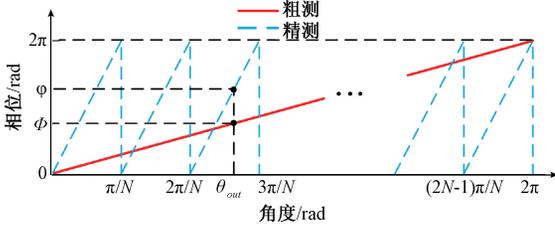


图3 传感器绝对定位测量示意图

Fig. 3 Method of absolute positioning measurement

3 实验系统设计

3.1 传感器样机设计与实验平台搭建

为验证所提出的传感器的性能,制作了外径100 mm、内径50 mm的传感器样机,第一级内外环对极数均为60,第二级内环对极数为59,外环对极数为60,搭建了如图4所示的实验平台。

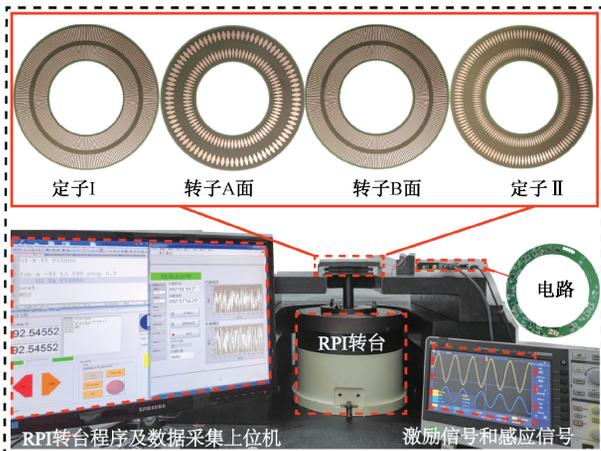


图4 实验平台

Fig. 4 Experiment platform

该平台使用英国RPI公司的AP300精密气浮转台,在360°范围内能实现 $\pm 0.4''$ 的定位精度。传感器安装到机械工装上,由工控机控制并显示转台的位置信息,由信号处理板采集传感器位置信息,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,定子I、II与转子的间隙均为0.2 mm。实验平台位于地下超洁净实验室,具有恒定的温度与湿度,可有效隔绝外部环境干扰。

3.2 测量系统设计

图5为传感器信号处理过程,电路处理模块中FPGA与DA转换器、运算放大器组成信号发生器,产生所需的交流激励信号。传感器经两级调制后得到最终的粗测信号与精测信号,信号经差分放大并滤波后通过比较器将模拟信号转换为数字信号。转换后的感应信号将保留表征位置信息的相位信息,在FPGA中以高速时钟内插实现相位与位移的转换,传感器的理论分辨率 θ_{res} 可表示为:

$$\theta_{res} = \frac{f_c}{Nf_s} \times 1\,296\,000'' \quad (15)$$

式中: f_s 为高速脉冲信号频率; f_c 为感应信号频率,其与激励信号频率保持一致; N 为传感器对极数。并且在 f_s 与 f_c 一定时,对极数 N 越大对应传感器分辨率越高。传感器外环采用二次调制等效对极数加倍,故其理论分辨率提升1倍。本测量系统中 f_s 等效于1 600 MHz, f_c 为20 KHz,传感器经过二次调制后等效于120对极,由此可得到传感器的理论分辨率为 $0.135''$ 。

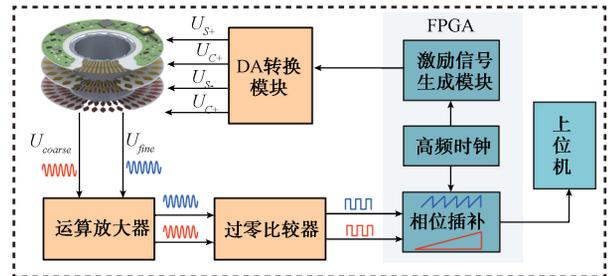


图5 信号处理过程

Fig. 5 Sensor signal processing

4 实验结果分析与优化

4.1 实验结果

对原型传感器粗测部分整周误差、精测部分整周误差、精测部分对极内误差进行测量,图6为传感器粗测部分的误差曲线,如图所示误差大小为 $3\,349''$ 。外环精测环经过二次调制后对极数增加一倍,等效为120对极,单个对极所对应的角度值为 3° 即 $10\,800''$,粗测环误差小于单个对极对应的角度,可以实现绝对定位。

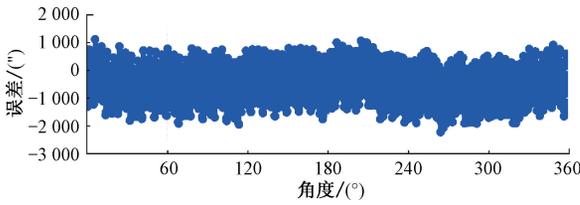


图 6 优化前粗测部分误差曲线

Fig. 6 Error and spectrum of rough measurement before optimization

图 7 所示为传感器精测部分整周误差与对极内误差及对应频谱图,图 7(a)为传感器的精测整周误差,误差大小为 11.1",图 7(b)所示为从整周误差中截取的传感器对极内误差,其误差大小为 8.2",对极内误差成分主要为一次谐波和四次谐波,且一次谐波幅值达到了 2.45"。

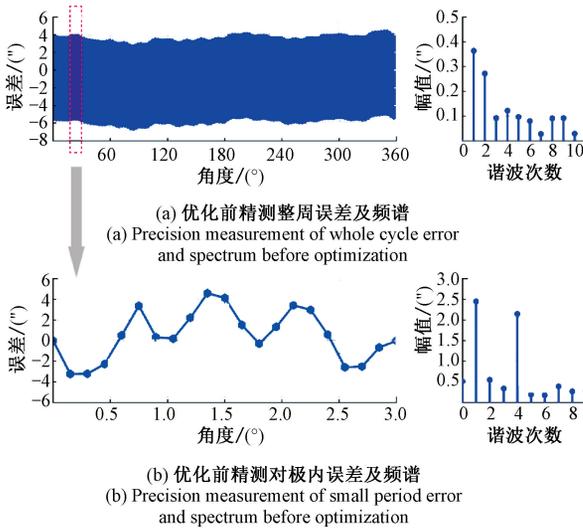


图 7 优化前精测部分误差曲线及频谱

Fig. 7 Error and spectrum of fine measurement

传感器整周误差较对极内误差略大,这是由于传感器安装制造误差引起的。传感器对极内误差中四次误差由电场耦合时的非线性电场引起,但对极内误差中一次谐波占比较大,需要进一步分析优化。

4.2 实验数据分析

从图 7(b)的频谱分析可知,精测部分对极内误差中一次谐波误差占比较大。理想条件下,内外环各自完成电场的两次耦合实现信号的二次调制。但从传感器结构分析,传感器工作时,内外环同时施加了交流激励,当外环施加激励时,外环激励信号在第一级内环感应电极上产生了串扰信号;同理,内环施加激励时,内环激励将在第一级外环感应电极产生串扰信号。当内

外环同时工作时,串扰信号参与了第二级耦合从而引入了测量误差。

为验证分析,仅在内环施加激励时,测量第一级外环感应电极上的串扰信号;仅在外环施加激励时,测量第一级内环感应电极上的串扰信号。串扰信号的大小如表 1 所示。

表 1 串扰幅值

Table 1 Crosstalk amplitude

串扰位置	内环精测环	外环粗测环
串扰幅值/mV	4.4	5.1

从表中数据看出,当内外环同时工作时,存在一定的串扰信号。显然,串扰信号将造成传感器感应信号的相位发生畸变,以外环精测环为例分析内环对外环串扰引起的感应信号相位畸变。

设内外环同时工作时,内环激励信号在第一级外环感应电极上产生的串扰信号为 $\Delta U_0 = a \sin(\omega t + \alpha)$,其参与了第二级耦合,考虑串扰信号的叠加可得到实际第二级外环精测信号为:

$$\begin{aligned}
 U_{fine} = & [K_2 \sin(\omega t - N\theta) + \Delta U_0] \times 2r_4 \Delta r_4 (1 - \cos N\theta) + \\
 & [K_2 \cos(\omega t - N\theta) + \Delta U_0] \times 2r_4 \Delta r_4 (1 + \sin N\theta) + \\
 & [-K_2 \sin(\omega t - N\theta) + \Delta U_0] \times 2r_4 \Delta r_4 (1 + \cos N\theta) + \\
 & [-K_2 \cos(\omega t - N\theta) + \Delta U_0] \times 2r_4 \Delta r_4 (1 - \sin N\theta) = \\
 & -4K_2 r_4 \Delta r_4 [\sin(\omega t - 2N\theta) - a \sin(\omega t + \alpha)] = \\
 & -4K_2 r_4 \Delta r_4 \sqrt{[(\cos 2N\theta - 2a \cos \alpha)^2 + (\sin 2N\theta - 2a \sin \alpha)^2]} \times \\
 & \sin\left(\omega t + \arctan \frac{\sin 2N\theta - 2a \sin \alpha}{\cos 2N\theta - 2a \cos \alpha}\right) \quad (16)
 \end{aligned}$$

因此,将实际得到的外环感应信号与理论感应行波信号进行相位比较,得到的相位偏差即为串扰信号引入的误差:

$$E = \frac{1}{2N} \left(\arctan \frac{\sin 2N\theta - 2a \sin \alpha}{\cos 2N\theta - 2a \cos \alpha} - 2N\theta \right) \quad (17)$$

由式(17)可得到内环对外环产生的串扰信号在外环精测环对极内测量结果中引入了一次误差,该误差大小由串扰信号幅值和相位决定。进一步可得出内外环同时工作时,内外环的串扰信号将在内环和外环分别引入测量误差。

4.3 传感器分时优化

内外环同时工作时将引入相互间的串扰,采用分时施加激励的优化方法可避免内外环受到对应的串扰影响。当传感器外环工作时,内环停止工作,外环将不会对内环产生串扰信号。同理,当传感器内环单独工作时,外环将不会对内环产生串扰。

传感器上电初始阶段仅对内环施加激励信号,内环得到传感器的绝对位置后,断开内环激励,对外环施加激励信号得到精确的位置信息。内外环工作在不同的时间段,可有效避免内外环同时工作时的串扰影响。根据此优化方法对传感器进行精度测试,得到的传感器的误差曲线如图8与9所示。

图8所示为传感器分时优化后的粗测误差曲线,其大小为 $3.037''$,仍满足绝对定位需求。图9所示为传感器优化后精测整周误差与精测对极内误差,其中精测整周误差为 $8.2''$,对极内误差大小为 $6.8''$,对极内误差中一次谐波大小为 $0.5''$,较优化前的 $2.45''$ 大幅降低。

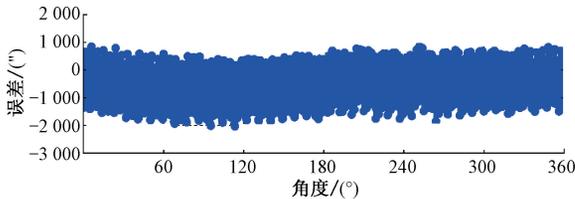


图8 优化后粗测部分误差曲线

Fig. 8 Optimized error and spectrum of rough measurement

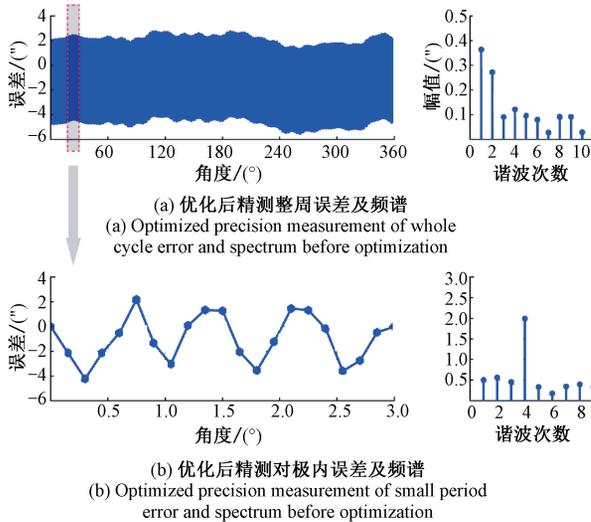


图9 优化后精测部分误差曲线及频谱

Fig. 9 Optimized error and spectrum of fine measurement

优化后外环对极内误差中一次误差幅值大幅衰减的实验结果进一步验证了外环受内环串扰叠加时式(16)与(17)中的理论推导。同时,分时优化方法本质上是基于串扰来源、实验分析及理论推导后,协调内外环工作时段以避免串扰的叠加影响所实现的。

在采用分时优化的基础上对传感器的实际分辨率进行测量。实验过程中通过逐步减小RPI转台的步长以得到实际分辨率,测量结果如图10所示。经过二次调制后其实际分辨率为 $0.4''$ 。

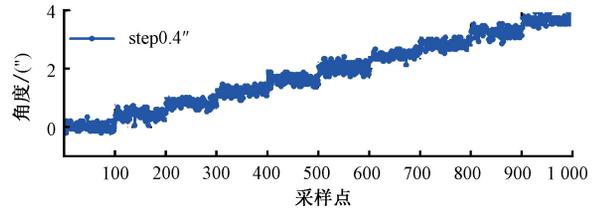


图10 优化后传感器精测环分辨率

Fig. 10 Optimized sensor resolution of precision measurement ring

5 结 论

本文提出了一种采用多层传感结构实现信号二次调制的高精度绝对式时栅角位移传感器。传感器利用多层传感结构,拓展并利用了轴向空间,将传感器第一级得到的内外环感应信号作为激励信号施加到第二级内外环实现信号的二次调制。二次调制后得到等效对极数为1的粗测信号与等效对极数加倍的多对极精测信号,制造了外径 $\Phi=100\text{ mm}$ 、内径 $\Phi=50\text{ mm}$ 的传感器样机。经初步实验与分析验证后,传感器采用分时施加激励的优化方法协调内外环工作时段,避免了内外环同时工作时的相互串扰影响,降低了精测环对极内一次谐波误差的幅值。最终实验表明传感器可实现绝对定位,精测环实际分辨率为 $0.4''$,原始测量精度达到 $\pm 4.1''$ 。

参考文献

- [1] 程强,徐文祥,刘志峰,等.面向智能绿色制造的机床装备研究综述[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(6):31-38.
CHENG Q, XU W X, LIU ZH F, et al. A review of machine tool equipment research for intelligent green manufacturing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(6): 31-38.
- [2] OZTEMEL E, GURSEV S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(1): 127-182.
- [3] 谭久彬.超精密测量是支撑光刻机技术发展的基石[J].仪器仪表学报,2023,44(3):1-7.
TAN J B. Ultra-precision measurement: The cornerstone of the lithography development[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 1-7.
- [4] 周亮,王振环,孙东辰,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.
- [5] KUMAR A S A, GEORGE B, MUKHOPADHYAY S C. Technologies and applications of angle sensors: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(6): 7195-7206.
- [6] 王淑娴, 彭东林, 吴治峰, 等. 伺服电机位置检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 143-153.
- WANG SH X, PENG D L, WU ZH Y, et al. Review of position estimation techniques for servo motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 143-153.
- [7] MATSUKUMA H, MADOKORO S, ASTUTI W D, et al. A new optical angle measurement method based on second harmonic generation with a mode-locked femtosecond laser [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2019, 2(4): 187-198.
- [8] YU H, CHEN X, LIU C, et al. A survey on the grating based optical position encoder [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 143: 107352.
- [9] SHI Y, NI K, LI X, et al. Highly accurate, absolute optical encoder using a hybrid-positioning method [J]. Optics Letters, 2019, 44(21): 5258-5261.
- [10] 张建辉, 陈震林, 张帆. 绝对式光电编码器的编码理论研究进展[J]. 振动. 测试与诊断, 2021, 41(1): 1-12.
- ZHANG J H, CHEN ZH L, ZHANG F. Advances in coding theory of absolute optical encoders[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 1-12.
- [11] YUAN P, HUANG D, LEI Z, et al. An anti-spot, high-precision subdivision algorithm for linear CCD based single-track absolute encoder [J]. Measurement, 2019, 137: 143-154.
- [12] 徐宗伟, 李龚浩, 兀伟, 等. 滚压印圆柱母光栅的微刻划制造 [J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 11(6): 473-478.
- XU Z W, LI G H, WU W, et al. Precise micro-cutting fabrication of roller imprint cylindrical grating template [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013, 11(6): 473-478.
- [13] YE G, LIU H, YAN J, et al. Fabrication of high edge-definition steel-tape gratings for optical encoders [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(10): 105006.
- [14] SHI L, ZENG L, LI L. Fabrication of optical mosaic gratings with phase and attitude adjustments employing latent fringes and a red-wavelength dual-beam interferometer [J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21530-21543.
- [15] WANG X, PANG Z, YANG H, et al. Theoretical study of subwavelength circular grating fabrication based on continuously exposed surface plasmon interference lithography [J]. Results in Physics, 2019, 14: 102446.
- [16] ZHAO C, WAN Q, LU X, et al. Moiré fringe signal subdivision system of a stained code disc of a grating displacement sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(9): 8614-8621.
- [17] 任雪玉, 黄焱, 薛梓, 等. 一种光栅莫尔信号数字锁相细分方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 25-34.
- REN X Y, HUANG Y, XUE Z, et al. A digital phase-locking subdivision method for grating Moiré signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 25-34.
- [18] 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.
- [19] 张宇鹏, 徐钰蕾, 王昱棠. 高精度电容式角位移传感器测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 147-150.
- ZHANG Y P, XU Y L, WANG Y T. Measurement method of high-precision capacitive angular displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S1): 147-150.
- [20] HOU B, ZHOU B, SONG M, et al. A novel single-excitation capacitive angular position sensor design [J]. Sensors, 2016, 16(8): 1196.
- [21] 王睿, 李新娥, 杜红棉, 等. 容栅式微小位移传感器边缘效应研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(9):

173-177.

WANG R, LI X E, DU H M, et al. Research on edge effect of capacitance micro displacement sensor [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(9): 173-177.

- [22] 彭凯,刘小康,于治成,等. 电极几何尺寸误差对纳米时栅位移传感器测量精度的影响及其抑制方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(7):21-27.

PENG K, LIU X K, YU ZH CH, et al. The influence of electrode geometric size error on the measurement accuracy of nanometer time grating displacement sensor and its suppression method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(7): 21-27.

- [23] PENG K, YU Z, LIU X, et al. Features of capacitive displacement sensing that provide high-accuracy measurements with reduced manufacturing precision[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7377-7386.

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: lxk@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.



康成莹,2019年于重庆理工大学获得学士学位,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: 15683550252@163.com

Kang Chengying received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2019. He is currently pursuing his master degree at Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensor.



于治成(通信作者),2012年于重庆工商大学获得学士学位,2015年于重庆理工大学获得硕士学位,2019年于合肥工业大学获得博士学位,现为重庆理工大学助理研究员,主要研究方向为传感技术与智能仪器。

E-mail: yzc@cqut.edu.cn

Yu Zhicheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing Technology and Business University in 2012, received his M. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2015, and received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2019. He is currently an assistant research fellow at Chongqing University of Technology. His main research interests include sensing technology and intelligent instrumentation.