

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007015

一种离散阵列的平面二维电场式时栅位移传感器^{*}

王合文¹, 彭 凯², 刘小康², 蒲红吉², 于治成²

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009;

2. 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:针对平面二维光栅位移测量技术在高精度和大量程之间难以兼顾的现状,基于前期一维电场式时栅的研究基础,提出了一种离散阵列结构的二维电场式时栅位移传感器。传感器采用平面正交离散栅面空间排布的编码方法,实现了对平面二维电场式时栅激励电极编码;建立了平面二维电场式时栅位移测量模型,从理论上推导了受 X 和 Y 两个方向位移信息调制的耦合信号表达式;提出了一种二维位移测量信号直接解耦方法,利用差动感应电极空间位置关系,通过简单的加减运算实现了测量信号的解耦。使用PCB工艺制造了传感器样机并进行了性能测试,验证了提出的编码和解耦方法的可行性。最终结果表明,所提出的传感器在160 mm×160 mm测量范围内, X 和 Y 方向测量误差峰峰值分别为13.1 μm 和11.8 μm 。

关键词:电容式传感器;二维位移测量;时栅;大量程;离散阵列

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Planar two-dimensional electric field time-grating displacement sensor with discrete array

Wang Hewen¹, Peng Kai², Liu Xiaokang², Pu Hongji², Yu Zhicheng²

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

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

Abstract: The planar two-dimensional grating displacement measurement technology is difficult to achieve balance between high precision and large range. To address this issue, a two-dimensional electric field time grating displacement sensor with a discrete array structure is designed, which is based on the research foundation of the one-dimensional electric field time grating in the early stage. A coding method of planar orthogonal discrete grating surface spatial arrangement is utilized in the sensor to realize the coding of planar two-dimensional electric field time grid excitation electrodes. A planar two-dimensional electric field time grating displacement measurement model is formulated, and the coupling signal expression modulated by the displacement information in the X and Y directions is theoretically deduced. A method for direct decoupling of two-dimensional displacement measurement signals is proposed, which uses the spatial position relationship of differential sensing electrodes to realize the decoupling of measurement signals through simple addition and subtraction operations. The sensor prototype is established by using PCB technology and performance tests are implemented to evaluate the feasibility of the proposed coding and decoupling method. The final result shows that the sensor proposed in this paper has the peak-to-peak measurement errors of 13.1 μm and 11.8 μm in X and Y directions respectively in the measurement range of 160 mm×160 mm.

Keywords: capacitive sensor; two-dimensional displacement measurement; time grating; large range; discrete array

收稿日期:2020-10-19 Received Date: 2020-10-19

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51905063,51935004)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201801127)资助

0 引言

纳米位移测量技术及器件是纳米数控机床、极大规模集成电路专用设备超精密高端装备的核心技术和关键功能部件^[1-2]。随着高端制造业的不断发展,纳米位移测量技术在保证高精度和高分辨率的同时,也逐渐向大量程、多维度的方向发展^[3]。例如纳米数控机床、高端光刻等超精密加工设备,要求系统在工作台 X 、 Y 二维方向同时实现大量程高精度的位移测量。然而,目前能够在几百毫米实现大量程测量的仪器和传感器主要为激光干涉仪和纳米光栅^[4-5]。传统的测量方法通常是组合两个单自由度激光干涉仪或纳米光栅来实现二维平面位移测量。这种采用单自由度组合测量的方法,不符合阿贝原则,通常会引入较大的阿贝误差^[6]。此外,这种方法需要分别对两个传感器进行安装和标定,导致测量系统和机械结构复杂,需要较大的安装空间^[7-10]。

为了解决上述方法存在的问题,以单一传感器实现二维测量的位移传感器逐渐发展起来,其中以平面二维纳米光栅的研究成果最为突出。夏豪杰等^[11]以正交衍射光栅作为测量基准元件,设计了二维衍射光栅纳米测量系统,在 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 范围内通过细分后精度可达 $0.62\text{ }\mu\text{m}$,分辨率可达到 10 nm 。Li 等^[12]提出了一种栅距为 $0.57\text{ }\mu\text{m}$ 、尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的平面二维光栅尺,搭配多个读数头在 X 、 Y 两个方向上实现了亚微米级测量精度和 2 nm 的分辨率。Fan 等^[13]提出了一种尺寸为 $55\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 、 $1\text{ }740\text{ line/mm}$ 的平面衍射光栅尺,在 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 范围内,原始测量精度可达 $2.1\text{ }\mu\text{m}$,分辨率可达 1 nm 。

值得注意的是,上述提出的平面二维光栅的测量精度均在微米级与亚微米级之间,最大量程均不超过 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。这是由于光栅的测量精度取决于等间距栅线刻划的精密程度,量程则取决于栅尺的制造长度,两者在制造工艺难以同时兼顾。目前,光栅尺的制造普遍采用紫外线光刻法,受光波波长和光学衍射极限的制约,加工 $1\text{ }\mu\text{m}$ 等间距的栅线已非常困难,而平面二维光栅测量需要的是等间距的方形栅格,任一方向上的微小加工缺陷都会使整个栅格的形状失真,从而导致衍射效率降低甚至失效^[14]。因此,栅距在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下的栅格通常采用全息曝光法来制造,制造栅距可达 100 nm ,但此方法受干涉光束面积限制,导致栅尺的面积很难做大^[15-16]。因此,平面二维光栅难以同时实现 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 以上量程和微米级以上测量精度。

作者所在团队前期提出了一维电场式时栅位移传感器,实现了大量程纳米测量^[17]。在此基础上,本文提出了一种离散阵列结构的平面二维电场式时栅位移传感

器。该传感器在 X 、 Y 方向对激励电极进行离散式栅面排布,将一维的激励电极编码方式拓展到二维平面。同时,利用差分感应电极空间位置关系,通过简单的加减运算实现了两个维度测量信号的解耦。通过实验验证了传感器编码和解耦方法的可行性,实现了平面二维高精度、大量程测量,为平面二维位移测量领域提供了一种技术选择,具有巨大发展潜力。

1 平面二维电场式时栅传感器的测量原理

1.1 一维电场式时栅测量原理

一维电场式时栅位移传感器^[17-18]的结构如图1所示,由传感器由动尺和定尺组成。其中,定尺排列有四组矩形激励电极,依次连接相位相差 $\pi/2$ 的四路正弦激励信号 $U_{+s} = +A\sin\omega t$, $U_{+c} = +A\cos\omega t$, $U_{-s} = -A\sin\omega t$ 和 $U_{-c} = -A\cos\omega t$ 。其中, A 和 ω 分别为激励信号幅值和频率, t 为时间。将4组激励电极分别定义为 $+S$ 路、 $+C$ 路、 $-S$ 路和 $-C$ 路电极。激励电极宽度为 W , 长度为 L , 电极之间的间距为 I , 测量周期 $W_T = 4(W + I)$ 。动尺上排列有双正弦形感应电极(虚线框),其宽度为 $W_m = W_T/2$, 高度为 H 。

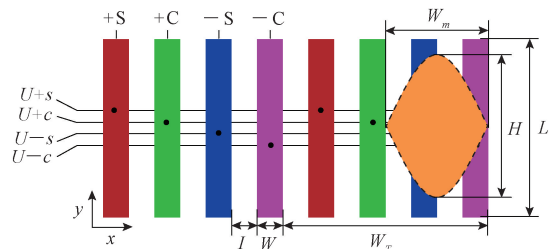


图1 一维电场式时栅传感结构

Fig. 1 One-dimensional nano-time grating sensing

传感器工作时,感应电极与激励电极发生相对移动,通过与激励电极之间重叠区域的面积变化耦合获得行波信号 U_o 。

$$U_o = (U_{+s}\Delta S_{+s} + U_{+c}\Delta S_{+c} + U_{-s}\Delta S_{-s} + U_{-c}\Delta S_{-c})/2S \quad (1)$$

式中: $\Delta S_{+s}, \Delta S_{+c}, \Delta S_{-s}, \Delta S_{-c}$ 表示单个感应电极与四路激励电极重叠区域的变化面积; S 表示单个感应电极与单个激励最大重叠面积。以连接 U_{+c} 的激励电极为例,其重叠区域的变化面积可以看作是矩形激励电极在余弦曲线上平移的变化区域,其变化面积可表示为:

$$\Delta S_{+c} = \int_{x-I/2-W_m}^{x-I/2} H \cos(2\pi x/W_T) dx = S \sin(2\pi x/W_T) \quad (2)$$

同理,可推导出另外3组变化面积 $\Delta S_{+s}, \Delta S_{-s}, \Delta S_{-c}$ 为:

$$\begin{cases} \Delta S_{+s} = S \cdot \cos(2\pi x/W_T) \\ \Delta S_{-s} = S \cdot (-\cos(2\pi x/W_T)) \\ \Delta S_{-c} = S \cdot (-\sin(2\pi x/W_T)) \end{cases} \quad (3)$$

因此,一维电场式时栅位移传感器行波信号输出 U_o 表示为:

$$U_o = \frac{A}{2S} (\sin\omega t \cdot S \cdot \cos(2\pi x/W_T) + \cos\omega t \cdot S \cdot \sin(2\pi x/W_T) - \sin\omega t \cdot S \cdot (-\cos(2\pi x/W_T)) - \cos\omega t \cdot S \cdot (-\sin(2\pi x/W_T))) = A \sin(\omega t + 2\pi x/W_T) \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,位移 x 与输出信号相位 $2\pi x/W_T$ 成正比。因此,将输出信号 U_o 通过信号处理电路整形为

方波,并送入 FPGA 与同频参考信号进行比相,利用高频时钟脉冲插补得到相位差,进而获得动尺和定尺的相对位移。

1.2 平面二维电场式时栅激励电极编码

为了在 X 、 Y 两个方向实现位移测量,首先需要对 X 、 Y 方向的激励电极进行正交编码。如果直接将两个测量方向相互垂直的一维激励电极在同一平面重叠,两个方向的激励电极会相互干涉,如图 2(a) 所示。若采用 X 、 Y 平面向下分层结构,会导致两个测量方向传感参数出现差异,造成后期信号解耦困难。因此,本文采用离散化的编码方式对平面二维电场式时栅的激励电极进行编码。

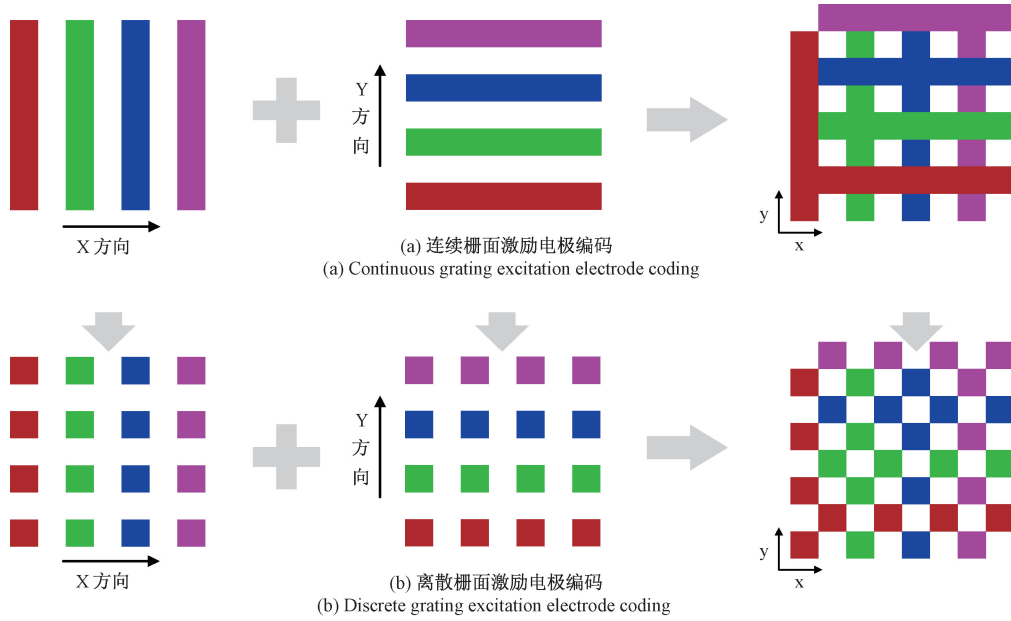


图2 二维激励电极编码

Fig. 2 Schematic of two-dimensional excitation electrode coding

将两个一维激励电极离散成等间距 I , 宽为 W 的正方形电极(与一维电场式时栅电极宽度和间距相同)。然后,在同一平面进行叠加,利用类似国际象棋棋盘形式对激励电极进行错位排布,进而实现激励电极在二维平面上的编码,其具体实现过程如图 2(b) 行所示。

采用这种编码方式,有效避免了激励电极之间的干涉,同时也保证了两个测量方向传感参数的一致性。此外,从图中可以看出,任一测量方向的激励电极由连续栅面变成了离散栅面的集合,因此产生的电场也是离散的。

为验证离散栅面设计的可行性,采用仿真软件对单一测量方向离散栅面和连续栅面在不同高度 $z=0$ 、 $z=W/16$ 和 $z=W/8$ 的电势情况进行仿真分析,结果如图 3 所示。可以看出,随着高度的增加离散栅面的电势分布规律逐渐趋近于连续栅面。当 $z=W/8$ 时,两者已无明显差别。

由此可知,采用这种离散化的编码方式对平面二维电场式时栅激励电极进行编码完全可行。

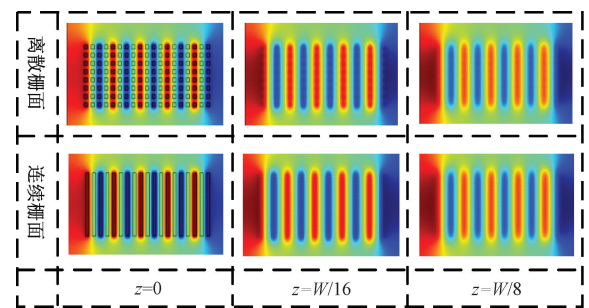


图3 离散栅面与连续栅面电势对比

Fig. 3 Discrete grating and continuous grating generated electric potential comparison

1.3 平面二维电场式时栅信号产生机理

平面二维电场式时栅位移传感器的整体结构如图4所示,其由分别排列有激励电极和感应电极的定、动尺组成。定尺设计为图2(b)所示的离散阵列结构。动尺由四组宽 $2(W+I)$ 的正方形感应电极构成,并顺时针定义为感应电极A、B、C、D。动尺与定尺平行正对,X、Y边沿相互平行且留有安装间隙 d 。传感器工作时,施加与一维电场式时栅相同的激励信号,并在感应电极上获取含有位移信息的行波信号。

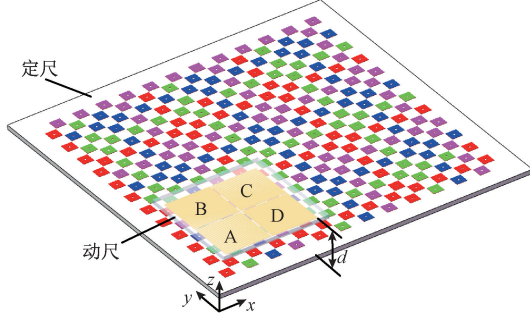


图4 传感器整体结构

Fig. 4 Overall structure of the sensor

由于X、Y方向激励电极编码方式类似,本小节详细分析了X测量方向行波信号的产生机理,同理便可推导获得Y方向的行波信号。首先,仅给X方向激励电极施加激励时,测量模型如图5(a)所示。感应电极A沿X方向移动,分别与下方排布的激励电极形成电容,其等效电路如图5(b)所示。

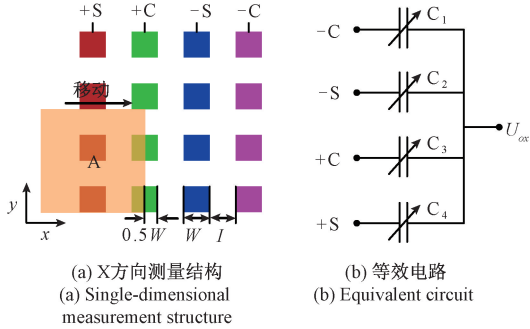


图5 X方向测量模型及等效电路

Fig. 5 X direction measurement model and equivalent circuit

根据电势叠加定理,可得输出信号 U_{ox} 为:

$$U_{ox} = U_{+s} \frac{C_4}{C_{sum}} + U_{+c} \frac{C_3}{C_{sum}} + U_{-s} \frac{C_2}{C_{sum}} + U_{-c} \frac{C_1}{C_{sum}} \quad (5)$$

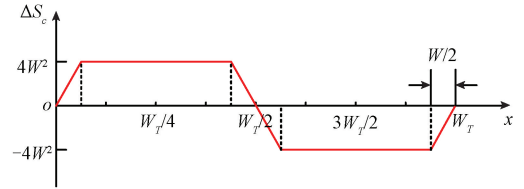
式中: C_4, C_3, C_2, C_1 分别表示+ S路电极、+ C路电极、- S路电极和- C路电极与感应电极A形成的电容; $C_{sum} = C_4 + C_3 + C_2 + C_1$ 。根据电容公式 $C = \epsilon S/d$ 可知,当介电常数 ϵ 和间隙 d 确定时,电容大小仅与电容极片正

对面积变化量 ΔS 有关。因此,在不考虑电容边缘效应时感应电极的输出信号可改写为:

$$U_{ox} = U_{+s} \frac{\Delta S_{+s}}{\Delta S_{sum}} + U_{+c} \frac{\Delta S_{+c}}{\Delta S_{sum}} + U_{-s} \frac{\Delta S_{-s}}{\Delta S_{sum}} + U_{-c} \frac{\Delta S_{-c}}{\Delta S_{sum}} = \frac{U_{+s} \Delta S_s}{\Delta S_{sum}} + \frac{U_{+c} \Delta S_c}{\Delta S_{sum}} \quad (6)$$

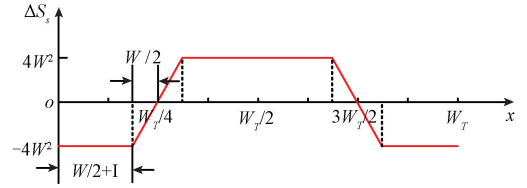
式中: $\Delta S_{+s}, \Delta S_{+c}, \Delta S_{-s}, \Delta S_{-c}$ 为 C_4, C_3, C_2, C_1 在一个测量周期内正对面积的变化量; $\Delta S_{sum} = 4W^2$ 表示感应电极A与激励电极正对重叠面积最大值; $\Delta S_s = \Delta S_{+s} - \Delta S_{-s}$ 表示S路激励电极与感应电极正对面积变化量; $\Delta S_c = \Delta S_{+c} - \Delta S_{-c}$ 表示C路激励电极与感应电极正对面积变化量。

以图5(a)所示为起始位置,在单个测量周期 W_T 范围内感应电极A与C路激励电极与S路激励电极正对面积变化量可作如图6(a)、(b)所示函数曲线 $\Delta S_c, \Delta S_s$ 。



(a) 面积变化函数 $\Delta S_c(x)$ 曲线

(a) Area change function $\Delta S_c(x)$ curve



(b) 面积变化函数 $\Delta S_s(x)$ 曲线

(b) Area change function $\Delta S_s(x)$ curve

图6 面积变化函数曲线

Fig. 6 Area change function curve

从图中可以看出,感应电极A沿X方向运动时,面积变化函数 $\Delta S_c, \Delta S_s$ 并非正弦波函数,而是以 W_T 为周期的梯形波函数。这是由感应电极A被设计为方形,而非一维时栅中的正弦形导致。将 ΔS_{sum} 与激励信号带入式(6),可得感应电极A输出信号 U_{ox} 为:

$$U_{ox} = \frac{A}{4W^2} \sin \omega t \cdot \Delta S_s(x) + \frac{A}{4W^2} \cos \omega t \cdot \Delta S_c(x) \quad (7)$$

根据三角函数辅助角公式:

$$a \sin \omega t + b \cos \omega t = \sqrt{a^2 + b^2} \sin \left(\omega t + \arctan \frac{b}{a} \right) \quad (8)$$

可将式(8)改写为:

$$U_{ox} = \frac{A}{4W^2} \sqrt{\Delta S_s(x)^2 + \Delta S_c(x)^2} \sin \left(\omega t + \arctan \frac{\Delta S_c(x)}{\Delta S_s(x)} \right) \quad (9)$$

为验证上述推导的正确性,利用 MATLAB 分别对标准行波信号和 U_{ox} 进行仿真,参数设置为 $A = 11 \text{ V}$, $W = \pi/5$, $I = 3\pi/10$ 。取横坐标为时间轴,其结果如图 7 所示。

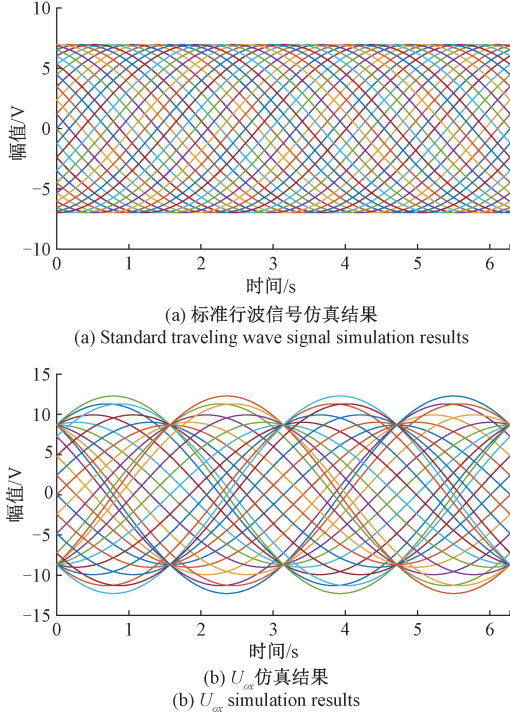


图 7 标准行波信号和 U_{ox} 仿真结果

Fig. 7 Standard traveling wave signal and U_{ox} simulation results

从图 7(a) 中可以看出,标准行波信号 U_o 幅值在测量周期内并未发生变化,与式(4)推导一致。图 7(b) 中所示 U_{ox} 幅值呈现 4 次变化,即 U_{ox} 在测量周期内会引入四次谐波误差^[18]。

采用同样的分析方式,可得感应电极 A 在 Y 方向移动时,仅施加 Y 方向激励时的行波信号 U_{oy} :

$$U_{oy} = \frac{A}{4W^2} \sqrt{\Delta S_s(y)^2 + \Delta S_c(y)^2} \sin\left(\omega t + \arctan \frac{\Delta S_c(y)}{\Delta S_s(y)}\right) \quad (10)$$

式中: $\Delta S_c(y)$ 、 $\Delta S_s(y)$ 表示感应电极 A 沿 Y 方向运动时与 C 路、S 路激励电极正对面积变化函数。

因此,传感器工作时,感应电极 A 上最终输出信号 U_{oa} 可表示为:

$$U_{oa} = U_{ox} + U_{oy} = \frac{A}{4W^2} \sqrt{(\Delta S_s(x) + \Delta S_s(y))^2 + (\Delta S_c(x) + \Delta S_c(y))^2} \cdot \sin(\omega t + \arctan(\frac{\Delta S_c(x) + \Delta S_c(y)}{\Delta S_s(x) + \Delta S_s(y)})) = A_{xy} \sin(\omega t + \varphi(x, y)) \quad (11)$$

式中: A_{xy} 为行波信号幅值; $\varphi(x, y)$ 为 U_{ox} 和 U_{oy} 叠加后的空间相位变化函数。在间隙 d 确定的情况下, U_{oa} 相位与动、定尺在 X、Y 方向的相对位移和感应电极形状有关。

1.4 平面二维位移测量信号解耦

由于式(11)中的输出信号 U_{oa} 中同时包含 X 和 Y 两个维度的相位信息,动、定尺相对移动时,难以分辨是 X 或 Y 方向产生的位移。因此,需要对感应电极的输出信号进行解耦,进一步分解出 X、Y 方向的位移信息。

本文提出了一种简单且有效的解耦方法,只需将感应电极 A、B、C、D 输出信号进行简单的加减运算,便能实现了两个维度输出信号的解耦,具体解耦方法如图 8 所示。

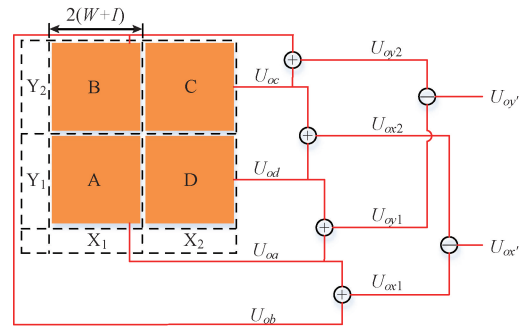


图 8 输出信号解耦示意图

Fig. 8 Schematic diagram of output signal decoupling

将 4 个方形感应电极 A、B、C、D 在单个测量周期 $4(W+I)$ 内,沿 X 或 Y 方向以差动结构形式排布,使得任意两个感应电极在该方向的输出信号空间相位相差 π 。因此,根据激励电极正交排列方式及三角函数公式 $\sin(\alpha + \pi) = -\sin(\alpha)$,可将感应电极 B、C、D 的输出信号表示为:

$$\begin{cases} U_{ob} = U_{ox} + U_{oy}(y + \pi) = U_{ox} - U_{oy} \\ U_{oc} = U_{ox}(x + \pi) + U_{oy}(y + \pi) = -U_{ox} - U_{oy} \\ U_{od} = U_{ox}(x + \pi) + U_{oy} = -U_{ox} + U_{oy} \end{cases} \quad (12)$$

对 4 组感应电极的输出信号按照图 8 所示的方法进行两两求和运算,解耦得到仅含有 X 或 Y 方向位移信息的输出信号 U_{ox1} 、 U_{ox2} 、 U_{oy1} 、 U_{oy2} 。

$$\begin{cases} U_{ox1} = U_{oa} + U_{ob} = 2U_{ox} \\ U_{ox2} = U_{oc} + U_{od} = -2U_{ox} \\ U_{oy1} = U_{oa} + U_{od} = 2U_{oy} \\ U_{oy2} = U_{ob} + U_{oc} = -2U_{oy} \end{cases} \quad (13)$$

理论上,通过两两求和的方式已经实现测量信号的解耦,然而由于电容边缘效应及激励信号的差异会引入共模干扰,导致解耦并不彻底。将式(13)中同一测量方向的输出信号进行作差,进一步滤除干扰信号。传感器在 X 和 Y 方向最终的输出信号 $U_{ox'}$ 和 $U_{oy'}$ 表示为:

$$\begin{cases} U_{ox'} = U_{ox1} - U_{ox2} = (U_{oa} + U_{ob}) - (U_{oc} + U_{od}) = 4U_{ox} \\ U_{oy'} = U_{oy1} - U_{oy2} = (U_{oa} + U_{od}) - (U_{ob} + U_{oc}) = 4U_{oy} \end{cases} \quad (14)$$

从式(14)可知,传感器最终的输出信号 $U_{ox'}$ 和 $U_{oy'}$ 并不是同时含有 X 、 Y 方向位移信息的函数,它仅与单独含有 X 或 Y 方向位移信息的 U_{ox} 、 U_{oy} 有关,因此能够单独获得 X 、 Y 方向的变化位移。

2 信号处理系统及实验平台

2.1 信号处理系统设计

由上述理论分析可知,二维电场式时栅位移传感器在工作时,需要施加四路相位依次相差 $\pi/2$ 的正弦激励信号;同时,感应电极产生四路含有位移信息的行波信号,通过信号解耦得到最终的 X 、 Y 方向位移量。

二维电场式时栅位移传感器的激励信号产生和信号处理系统设计如图9所示。1)由数字信号发生器产生激励信号数字量,通过D/A转换生成四路正弦激励信号,并施加到定尺激励电极形成分别在 X 和 Y 方向匀速运动的交变电场;2)动尺与定尺产生相对位移,通过电场耦合得到行波信号 U_{oa} 、 U_{ob} 、 U_{oc} 和 U_{od} ;四路行波信号通过前置信号处理电路求和、作差、滤波、放大、整形处理后,转变为方波 U_{xp} 和 U_{yp} 后送入FPGA(现场可编程门阵列)与同频参考信号 S_r 进行比相,通过高频时钟脉冲插补得到 X 和 Y 方向的相位和周期。3)通过软件程序处理计算分别得到 X 、 Y 方向的电气位移值,并将其转化为线性位移单位后送入计算机显示。根据上述设计,加工制造的信号处理系统电路如图10所示。

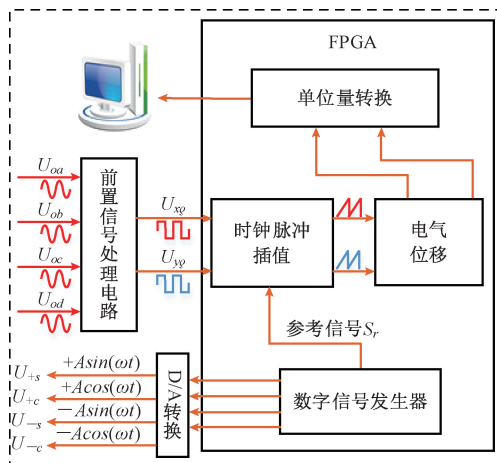


图9 二维电场式时栅信号处理原理

Fig. 9 Schematic of two-dimensional nanometer time-grating signal processing

2.2 传感器样机设计及实验平台搭建

为了验证所提出的传感原理,制造了如图10(a)、(b)所示的传感器样机。定尺和动尺上的电极按照图4设计,并采用标准PCB制造工艺制作,传感器的主要参数如表1所示。

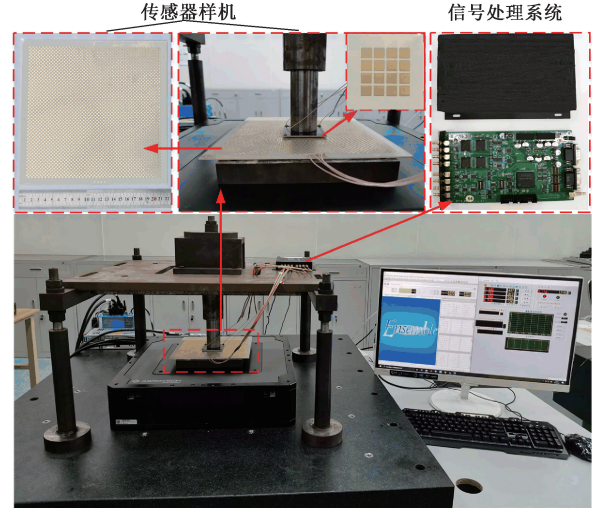


图10 实验平台

Fig. 10 Experiment platform

表1 传感器样机关键参数

Table 1 Key parameters of sensor prototype

参数	值
机械尺寸/定尺	220 mm×220 mm
机械尺寸/动尺	60 mm×60 mm
测量周期	20 mm×20 mm
排列周期/定尺	10
排列周期/动尺	2
厚度(定尺/动尺)	2 mm
激励幅值(A)	22 V
激励频率(ω)	20 kHz

此外,搭建了如图10下方所示实验平台。动尺固定于安装系统的支架上,并通过安装系统来调节动、定尺之间的间隙。定尺固定在安装基座上,并安装在系统精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的 Planer-300XY 二维移动平台(AEROTECH,美国)。因此,可将平台位移值作为测量基准,将由信号处理系统送入上位机的 X 、 Y 方向测量值与 Planer-300XY 平台的位移值进行比较,进而获得测量误差。

3 实验验证与分析

3.1 单周期测量误差分析

由于传感器在 X 和 Y 方向结构设计类似,因此在本

小节中主要对传感器在 X 方向的性能进行评估。在间隙 $d=1\text{ mm}$ 条件下,当动尺在 X 方向上移动一个测量周期 20 mm 时,以步长为 1 mm 静态采集数据,所得误差曲线如图 11 所示。

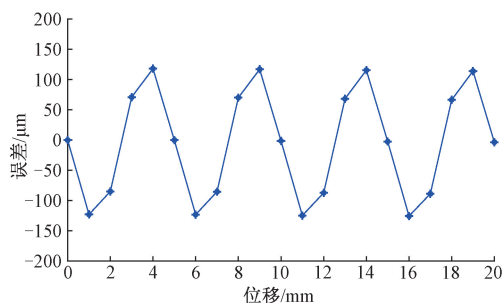


图 11 周期内误差

Fig. 11 In-period error

从图 11 可以看出,在单个测量周期内误差规律主要表现为四次谐波误差,其峰峰值为 $243.7\text{ }\mu\text{m}$ 。此处,周期内的四次谐波误差主要由空间域中的三次谐波分量引起,前期工作中已经进行了详细的论述^[18]。并且,可以通过升高间隙 d 来减小四次谐波误差,具体实验结果如图 12 所示。

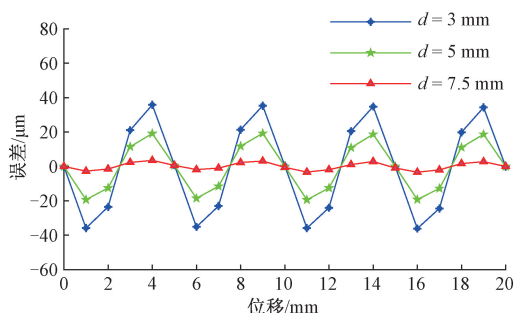


图 12 不同间隙下的周期内误差

Fig. 12 In-period error under different gaps

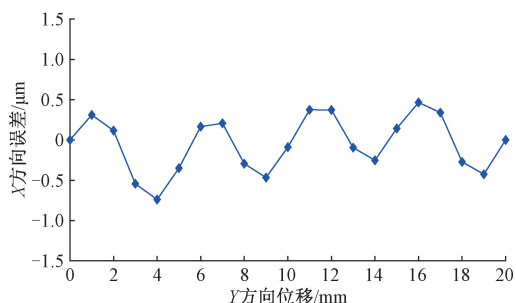
在单个测量周期内, $d=3\text{ mm}$ 时,测量误差为 $72\text{ }\mu\text{m}$; $d=5\text{ mm}$ 时,测量误差为 $38.66\text{ }\mu\text{m}$; $d=7.5\text{ mm}$ 时,测量误差为 $6.15\text{ }\mu\text{m}$ 。可以看出,随着间隙的升高,四次谐波误差逐渐减小。

3.2 平面二维信号耦合误差分析

由 1.3 小节分析可知,同一片感应电极的输出信号同时含有 X 和 Y 两个维度的位移测量信息,即在输出信号上存在两个维度位移信号相互耦合的问题。虽然,通过全组合解耦方法获取了单一维度上的位移测量信号,但由于传感器是以电场耦合的方式工作, X 或 Y 方向的空间谐波误差分量也会给另一测量方向的感应信号带来干扰,进而导致两个维度测量信号之间解耦不彻底。

为验证 X 、 Y 两个维度测量信号的解耦程度,设计了

如下实验。以 Y 对 X 方向干扰为例,在间隙 $d=7.5\text{ mm}$ 的安装条件下, X 方向固定不动, Y 方向以步长 1 mm 进行移动。此时,采集 X 方向测量值,并与 Planer-300XY 平台位移值作差,其结果如图 13 所示。

图 13 Y 方向位移对 X 测量值影响Fig. 13 Effect of Y direction displacement on X measurement value

可以看出,当 Y 方向移动一个测量周期, X 方向测量值会发生改变,其误差变化规律体现为四次谐波,大小为 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 。在同等间隙条件下,与 X 方向测量误差对比,耦合误差占比约为 19.5% ,可见解耦程度还需进一步提高。

3.3 平面二维大量程测试

为了评估传感器在两个维度的整体性能,在二维平面 $160\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ 测量范围内进行了大量程实验,以 20 mm 为步长,其测量结果如图 14 所示。

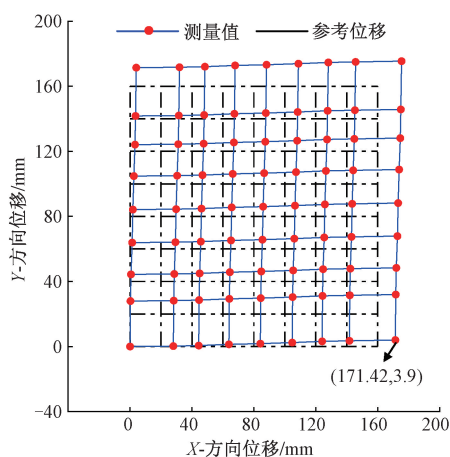
图 14 $160\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ 测量值(误差放大 1 000 倍)Fig. 14 Measurement value within $160\text{ mm}\times 160\text{ mm}$ (the errors magnified by 1 000 times)

图 14 中,虚线的交点为二维位移平台的测量值,作为参考位移;带点的曲线为二维电场式栅位移传感器 X 、 Y 方向的测量值。这里,由于在二维大量程测量结果中,测量值与误差量级差异较大,测量结果难以体现误差特性。因此,将测量误差放大 1 000 倍处理后加上参考

点位移得到图14中的测量值。从图中可以看出,随着动尺沿测量方向移动,会在其正交方向产生线性累计误差。以右下方测量点为例,其测量点坐标与参考点坐标分别为(171.42, 3.9)、(160, 0)。将两点在 X 、 Y 方向的值对应相减,得到该点在 X 、 Y 方向的误差值分别为11.42 mm和3.9 mm。由于作图时对误差进行了1 000倍放大,因此 X 、 Y 方向的实际误差分别为11.42和3.9 μm 。造成这种非测量方向线性累计误差的主要原因在于制造工艺难以保证在 X 、 Y 方向电极排布完全正交,进而给大量程误差带来线性偏移。

图14中主要反映了测量值与参考位移之间的关系,并不能直观体现两个自由度上误差规律。因此,将图14测量值中的测量误差提取并作如图15所示的二维测量误差曲线。

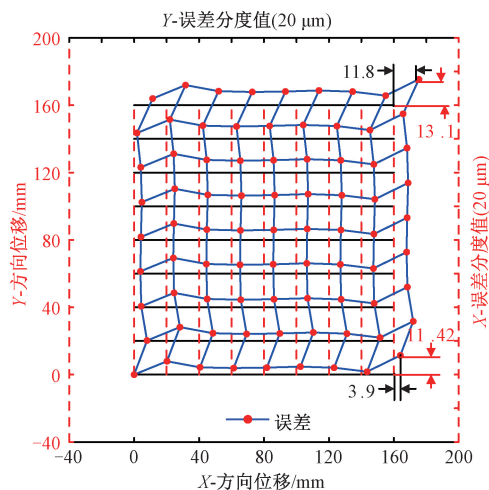


图15 160 mm×160 mm 测量误差

Fig. 15 Measurement error within 160 mm × 160 mm

观察 X 方向测量误差时,横向实线为基准轴,纵向虚线与右侧坐标轴表示 X 方向误差分度值。带有点的实线误差曲线与对应基准轴之间的偏差对应到右侧误差分度值坐标轴,即可得到 X 方向测量误差峰峰值。同理,观察 Y 方向测量误差时,纵向虚线为基准轴,横线实线实现与上方坐标轴表示 Y 方向误差分度值。以与图14中右下方测量点对应的误差点为例,该点在 X 和 Y 方向与基准轴的偏差分别为11.42和3.9 μm 。

从图15中可以直观看出,二维平面上的最大误差点为右上角误差点,其 X 和 Y 方向误差峰峰值分别为13.1和11.8 μm 。

此外,从图中单方向的误差曲线可以看出,随着 X 或 Y 方向的移动,在头部和尾部误差变化相对剧烈。这是由于直线位移传感器为非封闭性结构,在 X 和 Y 头尾两侧极片数量差异较大导致电场分布不均匀,进而在头尾部测量周期内引入一次误差和相位偏置。

4 结 论

本文在前期一维电场式时栅的研究基础上,提出了一种基于离散阵列结构的平面二维电场式时栅位移传感器。采用平面正交离散栅面空间排布的方式,实现了平面二维电场式时栅激励电极的编码;建立了平面二维电场式时栅位移测量模型,从理论上推导了受 X 和 Y 两个方向位移信息调制的耦合信号表达式;此外,提出了一种二维位移测量信号直接解耦方法,利用差动感应电极空间位置关系,通过简单的加减运算实现了测量信号的解耦。采用PCB工艺制作传感器样机,并通过实验验证了提出的编码和解耦方法的可行性。首先,传感器在单维度周期内四次误差由空间三次谐波分量引起,能够通过升高间隙减小。其次,传感器尽管能够实现两个自由度解耦,但解耦不彻底。PCB制造精工艺导致的 X 、 Y 方向电极排布分非完全正交,使得 X 、 Y 在非测量方向存在线性累计误差,未来可更换为半导体制造工艺。最终,传感器在二维平面160 mm×160 mm测量范围内, X 和 Y 方向误差峰峰值分别为13.1和11.8 μm 。

在未来研究中,将重点解决测量信号解耦不彻底的问题,借助一维电场式时栅研究经验,从电场层面分析传感特征参数对平面交变电场的影响规律,对规律加以利用来设计优化传感器结构,降低交叉干扰,进一步提高传感器信号的解耦能力。此外,在保证精度的前提下,进一步扩大测量范围,实现几百毫米的平面二维测量。

参考文献

- [1] 王国彪,黎明,丁玉成,等. 重大研究计划“纳米制造的基础研究”综述[J]. 中国科学基金, 2010(2): 70-77.
WANG G B, LI M, DING Y CH, et al. Background, implementation, and management measure of the major research plan “fundamental study on nanomanufacturing”[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2010(2): 70-77.
- [2] 王国彪,邵金友,宋建丽,等. “纳米制造的基础研究”重大研究计划研究进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(25): 68-79.
WANG G B, SHAO J Y, SONG J L, et al. Research review of the nsfc major research plan “fundamental research on nanomanufacturing”[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(25): 68-79.
- [3] 刘焱,王烨. 位移传感器的技术发展现状与发展趋势[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(6): 81-85.
LIU Y, WANG Y. Present status and thrend of technical development of displacement sensor[J]. Techniques of Automation and Applications, 2013, 32(6): 68-85.
- [4] FLEMING A J. A review of nanometer resolution position

- sensors: Operation and performance [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 190 (1): 106-126.
- [5] GAO W, KIM S W, BOSSE H, et al. Measurement technologies for precision positioning [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2015, 64 (2): 773-796.
- [6] TEIMEL A. Technology and applications of grating interferometers in high precision measurement. *Precision Engineering*, 1992, 14(3): 147-154.
- [7] HEINRICH S, ULRICH N R, TILO P, et al. Optical methods for dimensional metrology in production engineering [J]. *Annals of CIRP*, 2002, 51(2): 685-99.
- [8] HEILMANN R K, CHEN C G, KONKOLA P T, et al. Dimensional metrology for nanometre-scale science and engineering: Towards sub-nanometre accurate encoders. *Nanotechnology* [J]. *Nanotechnology*, 2004, 15 (10): S504-511.
- [9] 冯斌, 罗叙萍. 二维位移传感器研究 [J]. *工具技术*, 2011, 45(11): 80-83.
- FENG B, LUO X P. Survey on two-dimensional displacement sensor [J]. *Tool Engineering*, 2011, 45(11): 80-83.
- [10] 石照耀, 张斌, 费业泰. 阿贝原则再认识 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(5): 1128-1133.
- SHI ZH Y, ZHANG B, FEI Y T. Re-visit to the Abbe principle [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(5): 1128-1133.
- [11] 夏豪杰, 费业泰, 范光照, 等. 基于衍射光栅的二维纳米位移测量技术 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2007(4): 83-86.
- XIA H J, FEI Y T, FAN G ZH, et al. 2D Nano-displacement measurement with diffraction grating [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007 (4): 83-86.
- [12] LI X, GAO W, MUTO H, et al. A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage [J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 771-781.
- [13] FAN K CH, LIAO B H, CHUANG Y CH, et al. Displacement measurement of planar stage by diffraction planar encoder in nanometer resolution [C]. *International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2012, 8443(8): 894-897.
- [14] KIMURA A, GAO W, KIM W, et al. A sub-nanometric three-axis surface encoder with short-period planar gratings for stage motion measurement [J]. *Precision Engineering*, 2012, 36 (4): 576-585.
- [15] 钱国林, 吴建宏, 李朝明. 米级光栅全息曝光拼接系统像差分析 [J]. *激光杂志*, 2013, 34(5): 16-18.
- QIAN G L, WU J H, LI CH M. The analysis of wave aberration of meter-sized mosaic-grating made in holographic exposure system [J]. *Laser Journal*, 2013, 34(5): 16-18.
- [16] ZENG L, LI L. Fabrication of square-lattice crossed gratings based on diffraction of a reference grating [C]. *Springer Berlin Heidelberg*, 2014: 827-830.
- [17] 彭凯, 于治成, 刘小康, 等. 单排差动结构的新型电场式时栅位移传感器 [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.
- [18] PENG K, LIU X K, CHEN Z R, et al. Sensing mechanism and error analysis of a capacitive long-range displacement nanometer sensor based on time grating [J]. *Sensors Journal IEEE*, 2017, 17(6): 1596-1607.

作者简介



王合文, 2014 年和 2017 年于重庆理工大学获得学士学位和硕士学位, 目前正在攻读合肥工业大学仪器科学与技术博士学位, 主要研究方向为传感器技术和智能仪器。
E-mail: hwwang1990@163.com

Wang Hewen received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Chongqing University of Technology in 2014 and 2017, respectively. He is currently pursuing his Ph. D. degree in instrumental science and technology at Hefei University of Technology. His main research interests include sensing technology and intelligent instrumentation.



彭凯 (通信作者), 2010 年于重庆大学获得学士学位, 2013 年于重庆理工大学获得硕士学位, 2016 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学助理研究员, 主要研究方向为机电一体化和智能仪器。
E-mail: pkgogo1987@163.com

Peng Kai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2010, received his M. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2013, and received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2016. He is currently an assistant research fellow at Chongqing University of Technology. His main research interests include mechatronic system intelligent instruments.



刘小康, 1999 年于重庆大学获得学士学位, 2002 年于重庆大学获得硕士学位, 2005 年于重庆大学获得博士学位, 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、重庆大学博士生导师, 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 Chongqing University. His main research interests include intelligent instruments and sensor.