

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107697

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*

彭凯, 刘小康, 于治成, 王合文, 蒲红吉

(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:在纳米时栅传感器的制造过程中,由加工工艺引入的制造误差主要表现为电极几何尺寸误差。通过运用分段面积积分方法进行数学建模,详细地分析了电极几何尺寸误差对测量精度的影响,并揭示了采用多个感应电极进行信号拾取会具有一种平均效应,能够有效地匀化由电极几何尺寸误差随机变化所引入的测量误差。采用制造精度在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 级的微纳加工工艺和制造精度在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 级的印制电路板(PCB)工艺分别制作了两套量程为 200 mm 的传感器样机,并进行了精度对比实验。实验结果表明,由于平均效应的作用,PCB工艺制作的样机经过简单的线性补偿后,在满量程内取得了 $\pm 250\text{ nm}$ 的测量精度,接近微纳加工工艺制作的样机的测量精度。实验结果验证了多个感应电极平均效应的有效性。

关键词:制造误差;电极几何尺寸误差;平均效应;栅式位移传感器;纳米时栅

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

Influence of electrode geometric errors on the measurement accuracy of nanometer time-grating displacement sensor and its suppression method

Peng Kai, Liu Xiaokang, Yu Zhicheng, Wang Hewen, Pu Hongji

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

Abstract: In the manufacturing process of nanometer time-grating sensor, the manufacturing errors caused by the processing technology are mainly manifested as the electrode geometric errors. By using the method of sectional area integral to build the mathematical model, the influence of electrode geometric errors on the measurement accuracy is analyzed in detail. It is revealed that there is an averaging effect when the signal is picked up by multiple induction electrodes, which can effectively homogenize the measurement errors caused by the random variation of electrode geometric errors. Two prototype sensors with a range of 200 mm are fabricated by micro-nano-machining technology with a manufacturing accuracy of $1\text{ }\mu\text{m}$ and printed circuit board (PCB) technology with a manufacturing accuracy of $10\text{ }\mu\text{m}$, respectively. Accuracy comparison experiment is carried out and experimental results show that, due to the averaging effect, the prototype made by PCB technology has achieved a measurement accuracy of $\pm 250\text{ nm}$ in the full range after simple linear compensation, which is close to the measurement accuracy of the prototype made by micro-nano-machining technology. Experimental results verify the effectiveness of the averaging effect of multiple induction electrodes.

Keywords: manufacturing errors; electrode geometric errors; averaging effect; grating type displacement sensor; nanometer time-grating

0 引言

以纳米光栅为代表的栅式位移传感器是高档数控机床、大规模集成电路专用设备精密高端装备的关键功

能部件^[1-2]。这类传感器采用周期重复的栅线或栅面作为测量基准,测量精度越高,对栅线或栅面制造的精密程度要求也越高^[2-4]。例如德国Heidenhain公司的LIP系列纳米光栅,在 270 mm 的量程内可达到 $\pm 140\text{ nm}$ 的测量精度,栅距仅为 $0.512\text{ }\mu\text{m}$,而制造精度达到几十个纳米^[5]。

收稿日期:2021-03-31 Received Date: 2021-03-31

* 基金项目:国家自然科学基金(51905063)、重庆市教委科学技术研究(KJQN201801127, KJQN202001133)项目资助

纳米光栅的栅线采用光刻、纳米压印、全息曝光等微纳加工工艺进行制造^[6-8]。无论哪种制造工艺,不可避免引入制造误差,使得栅线的微观形貌会表现出几何误差、线粗糙度、槽深误差等缺陷^[9-11]。这些制造误差会极大地影响光栅的衍射特性,从而引入测量误差^[10-13]。特别是栅线几何误差,由于代表了空间基准的位置偏移,将导致大量程范围内的累积误差出现^[13]。Wu等^[14-15]的研究表明,光栅的测头可以匀化光源照射范围内的栅线几何误差的影响,然而文献中只给出了这种匀化效果的统计学表达式,并未对其推导过程和作用原理进行解释。

纳米时栅采用宽度在毫米级以上的栅面来进行传感,利用电极重合面积的积分作用来调制信号^[16-17]。因此,电极的几何尺寸误差同样是影响测量精度的重要因素,对其研究将有助于传感结构优化和制造工艺改进,同时也可为其余栅式位移传感器的制造误差分析提供理论参考。本文根据纳米时栅的传感特性,采用分段面积积分方法进行建模,详细分析了电极几何尺寸误差对测量精度的影响,并揭示了多个感应电极具有平均效应,能够有效地匀化由电极几何尺寸误差随机变化所引入的测量误差。根据理论分析,设计了两种不同制造精度的传感器样机进行测量精度对比实验,验证了分析结果的正确性。

1 测量原理和分段面积积分方法

纳米时栅传感结构如图1所示,定尺基体上表面覆盖一排方形金属电极阵列,作为激励电极。以相邻的4个电极作为一个周期 W ,分别施加幅值为 A 、角频率为 ω 、相位依次相差 $\pi/2$ 的四路激励信号 $U_{s+} = -U_{s-} = A\sin\omega t$ 和 $U_{c+} = -U_{c-} = A\cos\omega t$ 。动尺基体下表面覆盖有半正弦形的感应电极,动尺和定尺正对平行安装并留有安装间隙 d ,感应电极通过电场耦合获取信号。根据施加信号的不同,依次定义激励电极为 $S+$ 、 $S-$ 、 $C+$ 和 $C-$, $S+$ 和 $S-$ 电极组成正弦路(S 路), $C+$ 和 $C-$ 电极组成余弦路(C 路)。理想情况下,感应电极与 S 路和 C 路激励电极分别构成两个差动平板电容,则感应电极上的输出信号与平板电容间的正对面积呈线性关系,输出信号可以表示为:

$$U_o = \frac{\Delta S_s(x)}{2S_0}(U_{s+} - U_{s-}) + \frac{\Delta S_c(x)}{2S_0}(U_{c+} - U_{c-}) \quad (1)$$

式中: $\Delta S_s(x)$ 和 $\Delta S_c(x)$ 分别表示 S 路和 C 路平板电容的有效重合面积, S_0 表示最大重合面积。下面采用分段面积积分方法来分别计算上述参数。

设感应电极长度为 L ,宽度 $W_d = W/2$,当其相对激励电极沿 x 轴移动时,重合面积可以采用余弦函数的变上下限积分来求得。以 C 路为例,忽略激励电极相邻间隔的影响($I=0$),建立等效模型如图2所示。

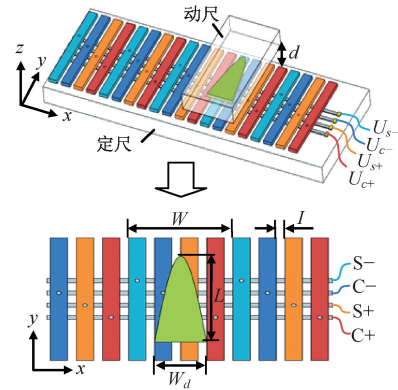


图1 纳米时栅传感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the nanometer time-grating sensor

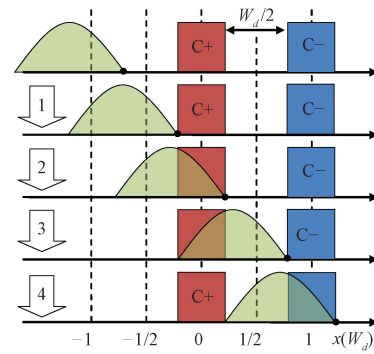


图2 分段面积积分方法等效示意图

Fig. 2 Equivalent diagram of piecewise area integral method

取 $-W_d/2$ 到 $W_d/2$ 区间内的 $C+$ 激励电极进行分析,并认为感应电极最右端点为初始位置,当感应电极通过这个激励电极时,面积变化 $\Delta S_{C+}(x)$ 经历了4个阶段,用分段积分函数表示如下:

$$\Delta S_{C+}(x) = \begin{cases} \int_{x-W_d/4}^{x-W_d/4} 0 dx = 0, & -3W_d/4 \leq x < -W_d/4 \\ \int_{-W_d/2}^{x-W_d/4} L \cos \frac{\pi x}{W_d} dx = \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin \left(\frac{\pi x}{W_d} - \frac{\pi}{4} \right) + 1 \right], & -W_d/4 \leq x < W_d/4 \\ \int_{x-3W_d/4}^{x-W_d/4} L \cos \frac{\pi x}{W_d} dx = \frac{\sqrt{2}LW_d}{\pi} \sin \frac{\pi x}{W_d}, & W_d/4 \leq x < 3W_d/4 \\ \int_{x-3W_d/4}^{W_d/2} L \cos \frac{\pi x}{W_d} dx = \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin \left(\frac{\pi x}{W_d} + \frac{\pi}{4} \right) + 1 \right], & 3W_d/4 \leq x < 5W_d/4 \end{cases} \quad (2)$$

同理,可求得 C-激励电极的面积变化 $\Delta S_{C-}(x)$ 为:

$$\Delta S_{C-}(x) = \begin{cases} 0, & W_d/4 \leq x < 3W_d/4 \\ \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi x}{W_d} - \frac{\pi}{4}\right) - 1 \right], & 3W_d/4 \leq x < 5W_d/4 \\ \frac{\sqrt{2}LW_d}{\pi} \sin \frac{\pi x}{W_d}, & 5W_d/4 \leq x < 7W_d/4 \\ \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi x}{W_d} + \frac{\pi}{4}\right) - 1 \right], & 7W_d/4 \leq x < 9W_d/4 \end{cases} \quad (3)$$

由于面积变化每 $2W_d$ 重复一个周期,而 C 路差动平板电容的有效重合面积可以表示为 $\Delta S_C(x) = \Delta S_{C+}(x) + \Delta S_{C-}(x)$,将式(2)和式(3)相同区间段内的积分结果求和后可知, $\Delta S_C(x)$ 在任意区间内表达式恒定不变,可表示为:

$$\Delta S_C(x) = \frac{\sqrt{2}LW_d}{\pi} \sin \frac{\pi x}{W_d} = S_0 \sin \frac{\pi x}{W_d} \quad (4)$$

上式中正弦函数的幅值即为最大重合面积 S_0 。采用同样的方法(只需将 x 左移 $W_d/2$)可求得 S 路有效重合面积为:

$$\Delta S_S(x) = \frac{\sqrt{2}LW_d}{\pi} \cos \frac{\pi x}{W_d} = S_0 \cos \frac{\pi x}{W_d} \quad (5)$$

将式(4)和(5)带入式(1)中,可求得最终输出信号为:

$$U_o = A \sin \omega t \cos \frac{\pi x}{W_d} + A \cos \omega t \sin \frac{\pi x}{W_d} = A \sin \left(\omega t + \frac{\pi x}{W_d} \right) \quad (6)$$

上式表示理想的行波信号,其相位变化与感应电极的相对位移 x 成正比,运用纳米时栅的高频脉冲插补方法就可求得相位变化,进而求得位移值^[16]。此外,上述推导结果与文献^[16-17]采用的等效面积变换方法所得出的结果是完全相同,而这种分段面积积分方法非常方便对单个电极的几何尺寸误差进行分析。

2 电极几何尺寸误差

2.1 几何尺寸误差建模

激励电极的几何尺寸误差表现形式为电极宽度变化,主要会造成电极相对位置发生移动,最终导致测量误差。本文引入 l_n 和 r_n 两个参数,分别表示激励电极相对于宽度 $W_d/2$ 的左边偏差和右边偏差,建立等效模型如图3所示:

这里 l_n, r_n 只取正数,意味着电极宽度小于 $W_d/2$ (实际情况下,由于 l 的存在, l_n, r_n 也可取负值,而分析方法不变)。由于 l_n, r_n 具有随机性,需要对每一个激励电极进行单独分析。仍然采用图2所示 C 路激励电极来讨

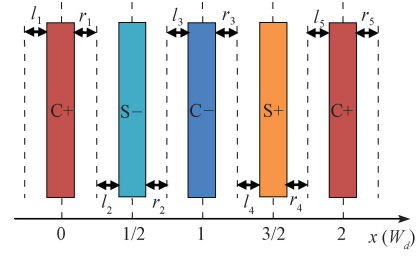


图3 具有几何尺寸误差的激励电极

Fig. 3 Excitation electrodes with geometric errors

论,通过分段面积积分方法求得此时的 $\Delta S_{C+}(x)$ 和 $\Delta S_{C-}(x)$ 分别表示为:

$$\Delta S_{C+}(x) = \begin{cases} 0, & -3W_d/4 \leq x < -W_d/4 + l_1 \\ \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi x}{W_d} - \frac{\pi l_1}{W_d} - \frac{\pi}{4}\right) + 1 \right], & -W_d/4 + l_1 \leq x < W_d/4 - r_1 \\ \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi x}{W_d} - \frac{\pi l_1}{W_d} - \frac{\pi}{4}\right) + \right. \\ \left. \sin\left(\frac{\pi x}{W_d} + \frac{\pi r_1}{W_d} + \frac{\pi}{4}\right) \right], & W_d/4 - r_1 \leq x < 3W_d/4 + l_1 \\ \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi x}{W_d} + \frac{\pi r_1}{W_d} + \frac{\pi}{4}\right) + 1 \right], & 3W_d/4 + l_1 \leq x < 5W_d/4 - r_1 \\ 0, & 5W_d/4 - r_1 \leq x < 5W_d/4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta S_{C-}(x) = \begin{cases} 0, & W_d/4 \leq x < 3W_d/4 + l_3 \\ \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi x}{W_d} - \frac{\pi l_3}{W_d} - \frac{\pi}{4}\right) - 1 \right], & 3W_d/4 + l_3 \leq x < 5W_d/4 - r_3 \\ \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi x}{W_d} - \frac{\pi l_3}{W_d} - \frac{\pi}{4}\right) + \right. \\ \left. \sin\left(\frac{\pi x}{W_d} + \frac{\pi r_3}{W_d} + \frac{\pi}{4}\right) \right], & 5W_d/4 - r_3 \leq x < 7W_d/4 + l_3 \\ \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi x}{W_d} + \frac{\pi r_3}{W_d} + \frac{\pi}{4}\right) - 1 \right], & 7W_d/4 + l_3 \leq x < 9W_d/4 - r_3 \\ 0, & 9W_d/4 - r_3 \leq x < 9W_d/4 \end{cases} \quad (8)$$

推广到所有 C+ 和 C- 激励电极,其面积变化求解方法都相同,只需取相应的积分区间和不同的 l_n, r_n 即可。同理可求得 S+ 和 S- 激励电极的面积变化,并得到 S 路和 C 路分别的面积变化 $\Delta S_S(x)$ 和 $\Delta S_C(x)$ 。将式(1)表示的输出信号改写为:

$$U_o = \frac{A}{S_0} (\Delta S_C(x) \cos \omega t + \Delta S_S(x) \sin \omega t) = \frac{A}{S_0} \sqrt{\Delta S_C(x)^2 + \Delta S_S(x)^2} \sin \left(\omega t + \arctan \frac{\Delta S_C(x)}{\Delta S_S(x)} \right) \quad (9)$$

那么测量误差可以表示为:

$$e(x) = \frac{W_d}{\pi} \left[\arctan \frac{\Delta S_C(x)}{\Delta S_S(x)} - \arctan \left(\tan \frac{\pi x}{W_d} \right) \right] \quad (10)$$

需要说明的是由于此时的 $\Delta S_S(x)$ 和 $\Delta S_C(x)$ 是分段函数,因此 U_o 和 $e(x)$ 同样为分段函数。若知道了对应区间内的 l_n, r_n , 计算出相应的 $\Delta S_S(x)$ 和 $\Delta S_C(x)$, 可得到激励电极存在几何尺寸误差时的输出波形和误差曲线。

2.2 几何尺寸误差的影响

取图4所示的一种特殊情况进行讨论,除了 l_5 和 r_3 外其余 l_n, r_n 都为0。观察感应电极的移动区间可以发现,当 l_5, r_3 足够小(小于 $W_d/10$), 余弦路的面积变化失真主要表现在区间 $[7W_d/4+l_5, 9W_d/4-r_3]$ 范围内。根据式(7)和(8)的计算结果求出这段区间内的面积变化表达式为:

$$\Delta S_C(x) = \frac{LW_d}{\pi} \left[\sin \left(\frac{\pi x}{W_d} - \frac{\pi l_5}{W_d} - \frac{\pi}{4} \right) + \sin \left(\frac{\pi x}{W_d} + \frac{\pi r_3}{W_d} + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (11)$$

由于此时的 $\Delta S_S(x)$ 是标准的余弦函数,将两者带入式(10)中可得到 $x \in [7W_d/4+l_5, 9W_d/4-r_3]$ 的误差表达式为:

$$e(x) = \frac{W_d}{\pi} \left[\arctan \frac{\sqrt{2} \cos \left(\frac{l_5+r_3}{2W_d} \pi + \frac{\pi}{4} \right) \sin \left(\frac{\pi x}{W_d} + \frac{r_3-l_5}{2W_d} \pi \right)}{\cos \frac{\pi x}{W_d}} - \arctan \left(\tan \frac{\pi x}{W_d} \right) \right] \quad (12)$$

又因为 l_5, r_3 足够小时,上式可以简化为:

$$e(x) = \frac{W_d}{\pi} \left[\arctan \left(\tan \frac{\pi x}{W_d} + \frac{r_3-l_5}{2W_d} \pi \right) - \arctan \left(\tan \frac{\pi x}{W_d} \right) \right] \quad (13)$$

采用求极值的方法求出上式在 $x=2W_d$ 时取得极值为 $e(2W_d) = (r_3-l_5)/2$, 这个极值即是这段区间内的误差峰值。

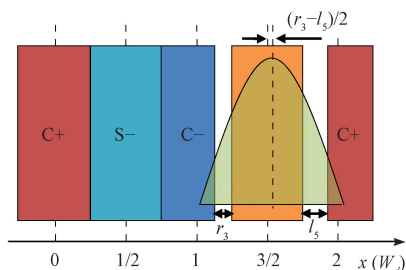


图4 只有 l_5 和 r_3 存在的特殊例子

Fig. 4 Special example with only l_5 and r_3

这个现象产生的原因在于,理想状态下感应电极位

于 $x=2W_d$ 时,其对称轴线位于 $x=3W_d/2$ 处,此时感应电极与 C+ 和 C- 激励电极的重合面积完全相等, C 路差动电容输出为 0。将这条重合面积相等时的轴线定义为过零线。当激励电极有了 l_5 和 r_3 的偏差时,过零线的位置相对于 $x=3W_d/2$ 有了 $(r_3-l_5)/2$ 的偏移,如图4所示,测量值也就相对于真实值有了 $(r_3-l_5)/2$ 的误差。推广到所有激励电极都存在左右尺寸偏差的情况,感应电极每经过一段过零区间的误差峰值可以表示为:

$$e_n = \frac{r_n - l_{n+2}}{2} \quad (14)$$

2.3 多个感应电极的平均效应

在纳米时栅的实际设计中,可以采用多个感应电极的平均效应可以有效地减小几何尺寸误差对测量精度的影响。由于 l_n, r_n 足够小,每个感应电极重合面积的变化与过零线的偏移量是近似线性关系,那么 m 个感应电极分别与覆盖区间内所有正负激励电极的重合面积相等时,其偏移量为误差最大值,可以表示为:

$$e_m = \frac{1}{2m} \left(\sum_{n=1}^{n+m} r_n - \sum_{n=1}^{n+m} l_{n+2} \right) \quad (15)$$

从式(15)可以看出,误差大小与单个感应电极相比减小为原来的 $1/m$;其次,误差由原来相邻的 r_n 与 l_n 的差值所决定变为了现在 m 个感应极片覆盖区间内所有 r_n 与 l_n 分别求和后的差值所决定。

由于制造误差具有随机性, r_n 与 l_n 分别求和后的值趋近于 0, 即多感应极片的平均效应能够有效地消除制造中的随机误差对测量结果的影响。此外,栅尺制造过程中,图形对位偏差、基材变形等因素往往会导致电极在一个大范围内整体往一个方向偏移,这部分误差在大量程的测量中表现为电极偏移量的累积误差,又称为系统误差。多个感应电极的平均效应对系统误差无效。

关于多个感应电极的平均效应以及电极几何尺寸误差中的随机误差、系统误差可以从统计学的角度进行进一步解释。将式(15)改写为如下形式,

$$e_m = \frac{1}{2m} \left(r_n + r_{n+1} + \sum_{n=2}^{n+m} r_n - \sum_{n=2}^{n+m} l_n - l_{n+m+1} - l_{n+m+2} \right) \approx \frac{1}{2m} \left(\sum_{n=2}^{n+m} r_n - \sum_{n=2}^{n+m} l_n \right) \quad (16)$$

设 $\Delta e = (r_n - l_n)/2$ 代表激励电极中心位置的偏移量,上式表明过零线的偏移量与激励电极中心位置的偏移量是完全等效的,由此建立等效模型如图5所示。

当 m 个感应电极在 N 个激励电极的定尺上移动,可以等效为从大小为 N 的总体里随机抽取大小为 m 的样本,满足抽样分布条件。总体里每个 Δe 是独立同分布的,总体的期望值为均值 μ_N , 标准差 σ_N 即表示所有 Δe 与总体均值的离散程度。 m 个感应电极每移动一个激励电极,都相当于对总体进行一次抽样,而式(16)即表示

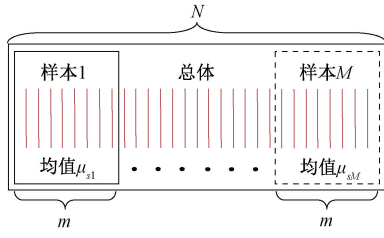


图5 随机抽样等效示意图

Fig. 5 Equivalent diagram of random samples

每个样本的均值。将每个样本的均值依次表示为 μ_{s1} 、 μ_{s2} 、 μ_{s3} 、 $\dots$ 、 μ_{sM} ，其中 $M=N-m$ ，根据中心极限定理，样本均值的标准误差可表示为：

$$\sigma_{\mu_s} = \frac{\sigma_N}{\sqrt{m}} \quad (17)$$

其中， σ_{μ_s} 表示样本的均值与总体均值的离散程度，即表示多个感应电极平均后的效果。此外，每个样本的均值 μ_{sM} 表示无法被平均的系统误差。而每个样本的标准差 σ_{sM} 表示每个样本内所有偏移量与这个样本均值的离散程度，这部分代表可以被平均的随机误差。需要特别说明的是，式(17)与文献[14-15]所给出的关于光栅测头对栅线几何误差匀化效果的公式是完全相同的，而上述推导过程也相当于对光栅测头的匀化效果进行了理论解释。

3 传感器样机和实验平台

在前期的研究工作中，采用光刻的微纳加工工艺制作纳米时栅传感器样机^[17]。微纳加工工艺具有很高的制造精度，能够很好的保证电极的精密性和一致性，然而其工艺复杂，制造难度大以及加工成本高。印制电路板(PCB)工艺则具有工艺简单，成熟稳定，价格低廉的优点，非常适合大批量低成本的应用场合，而缺点是制造精度相对较低。

采用微纳加工工艺和PCB工艺分别制作传感器样机如图6(a)所示。两套传感器的量程均为200 mm，激励电极和相邻间隔的理论宽度均为0.2 mm，对极宽度1.6 mm。感应电极理论宽度为0.8 mm，一个动尺上分布有30个感应电极。采用扫描电子显微镜(SEM)对电极的微观形貌进行评估，结果如图6(b)所示。从扫描结果可以看出，采用微纳加工工艺制作的传感器，电极实际宽度约184.5 μm 左右，宽度变化在1 μm 以内。与之相比，采用PCB加工工艺制作的传感器，电极实际宽度约240 μm 左右，宽度在10 μm 范围内随机波动。

为了测试两套传感器的测量精度并评估制造误差的影响，搭建如图6(c)所示实验平台。传感器的动尺和定

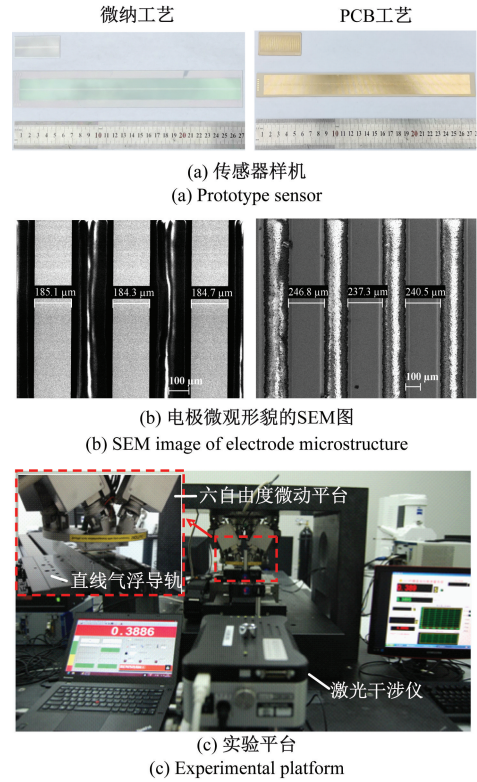


图6 纳米时栅传感器样机和实验平台

Fig. 6 Prototypes of the nanometer time-grating sensor and experimental platform

尺分别安装在Physik Instrumente H-824六自由度微动平台和Aerotech ABL2000直线气浮导轨上，安装间隙为0.2 mm。用气浮导轨带动定尺移动，将传感器的读数与Renishaw XL80激光干涉仪进行比较，描绘出误差曲线。两套传感器的实验参数均保持一致。

4 实验结果和分析

首先进行对极内精度对比实验，通过静态采集17个点描绘单周期误差曲线如图7所示。从实验结果可以看出，PCB工艺的传感器周期内误差峰峰值为0.96 μm ，略大于微纳加工工艺的0.78 μm ；两者的误差规律一致，主要表现为周期内的四次谐波误差。这个四次谐波误差是由电场特性所致并且能通过增加动定尺之间的安装间隙来消除，在前期的研究工作中已进行了详细的分析^[16]。对比SEM扫描结果，以上实验数据表明：尽管PCB工艺制作的传感器其电极几何尺寸误差在10 μm 左右，但是由于多个感应极片的平均效应的作用，消除了电极几何尺寸误差中随机误差的影响，使得最终周期误差峰峰值仍小于1 μm ，误差大小和规律与微纳加工工艺制作的传感器相差不多。

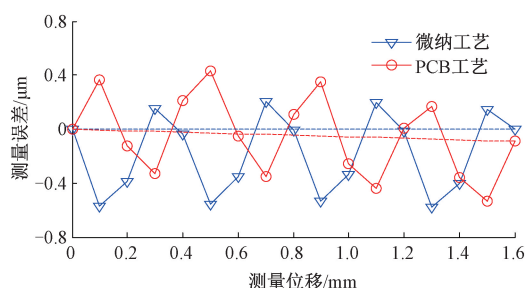


图7 单周期误差曲线

Fig. 7 Measurement error curves for single period

此外,微纳加工工艺制作的传感器周期误差内没有线性偏移成分,整周期封闭性很好,即最后一点能很好的回零;而PCB工艺制作的传感器周期误差却包含有一个线性偏移,在最后一出现了约 $0.08\text{ }\mu\text{m}$ 的偏差。根据前述分析可知,这个线性偏移量即是系统误差。将安装间隙升高到 0.4 mm 减小周期内四次谐波误差后,进行一组 200 mm 量程的精度对比实验,每3个对极采集一个点描绘误差曲线,结果如图8所示。

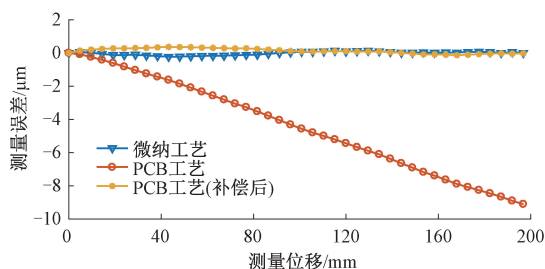


图8 满量程误差曲线

Fig. 8 Measurement error curves for full range

从结果可以看出,PCB制造的传感器满量程误差峰峰值为 $9.11\text{ }\mu\text{m}$,而微纳加工工艺制作的传感器误差峰峰值为 $0.34\text{ }\mu\text{m}$ 。此外,PCB制造的传感器在满量程上有一个明显的线性误差。这个误差是由每个电极的位置偏差逐渐累积而成,代表无法被平均的系统误差。

对比实验表明,PCB工艺制作的传感器,尽管电极的几何尺寸误差在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内波动,却可以通过多个感应电极的平均效应有效地消除其中占据主要成分的随机误差,使得满量程累积误差仅剩下 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右。因此,多个感应电极的平均效应可以有效地抑制几何尺寸误差对测量精度的影响。对于剩余的累积误差,可以采用简单的线性补偿的方法进行消除。补偿后满量程的误差峰峰值为 $0.50\text{ }\mu\text{m}$,接近采用微纳加工工艺制作的传感器的满量程误差峰峰值,因此可以认为两者测量精度水平相当。

5 结 论

本文基于纳米时栅位移传感器的测量原理,运用分段面积积分方法对由制造引起的电极几何尺寸误差的影响进行了详细的分析,结合实验验证,得出如下结论:

1) 由制造引入的电极几何尺寸误差可以等效为电极中心位置的偏移量,这个偏移量与采用单个感应电极所产生的测量误差峰值相等。而采用多个感应电极时,具有的平均效应可以有效地消除偏移量中占据主要成分的随机误差,从而极大地降低几何尺寸误差对测量精度的影响。本文所采用的分析方法和揭示的原理,对其余栅式位移传感器都是通用的,研究结果具有普遍意义。

2) 采用 $10\text{ }\mu\text{m}$ 级制造精度的PCB工艺制作了量程为 200 mm 的纳米时栅样机,并利用30个感应电极进行拾取信号,满量程初始误差仅为 $9.11\text{ }\mu\text{m}$ 。经过简单的线性补偿后,最终满量程的误差峰峰值为 $0.50\text{ }\mu\text{m}$,接近采用微纳加工工艺制作的传感器的满量程误差峰峰值,因此可以认为两者测量精度水平相当。实验结果验证了多个感应电极平均效应的有效性。此研究使采用低制造精度的PCB工艺制造高测量精度的纳米时栅具有了可能性,对纳米时栅传感器产品化具有重要意义。

参考文献

- [1] 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(5): 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(5): 68-79.
- [2] GAO W, KIM S W, BOSSE H, et al. Measurement technologies for precision positioning [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2015, 64: 773-796.
- [3] FLEMING A J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 190: 106-126.
- [4] HU P CH, CHANG D, TAN J B, et al. Displacement measuring grating interferometer: A review [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019, 20(5): 631-654.
- [5] TIEMANN I, SPAETH C, WALLNER G, et al. An international length comparison using vacuum comparators and a photoelectric incremental encoder as transfer standard [J]. Precision Engineering, 2008, 32: 1-6.
- [6] LIANG Y, MURPHY P, LI W D, et al. Self-limited self-perfection by liquefaction for sub- 20 nm trench/line fabrication [J]. Nanotechnology, 2009, 20: 465305.

- [7] 褚金奎,康维东,曾祥伟,等. 基于柔性纳米压印工艺制备中红外双层金属纳米光栅[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3034-3040.
- CHU J K, KANG W D, ZENG X W, et al. Fabrication of bilayer metallic nano grating in mid-infrared region based on flexible nanoimprint lithography [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(12): 3034-3040.
- [8] LI H, YANG C A, XIE S W, et al. Laterally-coupled distributed feedback lasers with optimized grating by holographic lithography etching [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(2): 140-144.
- [9] ZHOUE, ZENG L. Method to fabricate orthogonal crossed gratings based on a dual Lloyd's mirror interferometer [J]. Optics Communications, 2016, 360: 68-72.
- [10] HENN M, HEIDENREICH S, GROSS H, et al. The effect of line roughness on DUV scatterometry [C]. Proc. SPIE, 2013, 8789(5): 611-628.
- [11] GROSS H, HENN M, HEIDENREICH S, et al. Impact of line edge and line width roughness on diffraction intensities in scatterometry [C]. Proc. SPIE, 2012: 85503R.
- [12] 杨超,周鹏,周润森,等. 刻划光栅刻线弯曲误差在线修正技术研究[J]. 应用光学, 2019, 40(4): 658-662.
- YANG CH, ZHOU P, ZHOU R S, et al. Research on on-line correction technology of ruled grating curved error [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(4): 658-662.
- [13] 李晓天,巴音贺希格,齐向东,等. 机械刻划光栅的刻线弯曲与位置误差对平面光栅性能影响及其修正方法[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308009.
- LI X T, BA Y H X G, QI X D, et al. Influence and revising method of machine-ruling grating line's curve error, location error on plane grating' performance [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(3): 0308009.
- [14] WU C, YANG J, CHENG C, et al. Common-path laser encoder[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 189(2): 86-92.
- [15] WU C, HSU C, LEE J, et al. Littrow-type self-aligned laser encoder with high tolerance using double diffractions [J]. Optics Communications, 2013, 297(12): 89-97.
- [16] PENG K, LIU X K, CHEN Z, et al. Sensing mechanism and error analysis of a capacitive long-range displacement nanometer sensor based on time grating [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1596-1607.
- [17] 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.

作者简介



彭凯, 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, 2017 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: pk@cqut.edu.cn

Peng Kai 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 2017. 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、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 Beijing Institute 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.