

文章编号 1004-924X(2016)09-2271-12

变耦型时栅传感器及测头姿态对测量误差的影响

鲁进^{1*}, 陈锡侯², 汤其富², 武亮²

(1. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054;

2. 重庆理工大学 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘要:根据时栅传感器的测量原理,提出一种采用高频时钟脉冲作为测量基准的变耦型时栅位移传感器以提高位移测量的精度。该传感器通过改变激励线圈和感应线圈的耦合状态输出感应位移变化的行波信号来实现精密位移测量。进行了建模和仿真,研究了不同测头姿态下传感器的位移误差特性,并对其进行了谐波分析,得到了不同测头姿态对位移测量误差各次谐波的影响规律。根据传感器模型制作了传感器并开展了验证实验。仿真和实验结果均表明:不同测头姿态对位移测量误差的影响主要体现在对测量误差的1次、2次和4次谐波上,且俯仰姿态引入的附加误差最大,其余测头姿态下引入的位移测量附加误差均较小。若保证较佳的测头姿态,传感器在定尺和动测头间气隙厚度为0.3 mm时的原始误差约为 $\pm 18 \mu\text{m}$ 。实验分析结果与仿真结果基本一致。

关键词:时栅传感器;位移测量;测头姿态;安装误差;测量精度

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162409.2271

Variable coupling time grating sensor and effects of sensor-head attitudes on measuring errors

LU Jin^{1*}, CHEN Xi-hou², TANG Qi-fu², WU Liang²

(1. School of Electronic Information and Automation,

Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and

Advanced Testing Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: jinlu@cqut.edu.cn

Abstract: On the basis of the measuring principle of time grating sensors, a new variable coupling time grating displacement sensor was proposed by employing a high-frequency pulse as measurement basis to improve the precision of displacement measurement. The precision displacement measurement of the sensor was implemented by changing the coupling state of excitation and induction coils to output a traveling wave signal for inducing the displacement change. By modeling and simulations, the displacement error characteristics of the sensor when sensor-head was in different attitudes were obtained. The harmonics analysis was performed, and the influence of different sensor-head attitudes on different resonances of the displacement measurement errors was obtained. A sensor prototype was

收稿日期:2016-03-04;修订日期:2016-06-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51505052, No. 51405049);重庆市科技研发基地能力提升项目(No. cstc2014pt-sy40002)

designed based on the model and then experiments were carried out. Simulations and actual experiments indicate that different sensor-head attitudes mainly influence 1st, 2nd and 4th harmonics, and other harmonics are more sensitive to pitch attitudes than other attitudes of the sensor-head. When the sensor-head is in a good attitude and the gap between ruler and sensor-head is 0.3 mm, both experimental analysis and simulation result show that the measurement error is about $\pm 18 \mu\text{m}$. Simulations and actual verification experiments are in agreement well.

Key words: time grating sensor; displacement measurement; sensor-head attitude; mounting error; measuring precision

1 引言

时栅是近几年发展起来的一种将空间位移转换成时间差,再以时钟脉冲为基准实现精确测量的位移传感器,它具有测量精度高、抗干扰能力强、智能化程度高等优点,已在大量程纳米测量和极端、特殊环境下得到有效应用^[1-3]。在时栅传感器的加工和使用过程中,由于电子元器件稳定性差、温度起伏、激励电源电压波动、机械加工制造误差、机械使用过程中的变形和磨损等因素的影响,会引入测量误差,难以保证高精度位移测量的要求^[4-5]。前期的研究工作主要集中在对传感器进行优化设计和对测量系统进行标定补偿,虽然能在一定条件下提高和保持测量精度^[6-12],但仍有两个问题亟待解决:其一,前期研究的自标定方法均针对角度测量,而直线位移测量系统由于难以提供类似角度测量系统中的圆周封闭的自我基准而难以实现;其二,即使实施了有效的标定补偿,当传感器系统的安装状态无法保证时,测量精度也难以保证。

针对上述问题,本文从时栅传感器测量原理出发,首先提出一种用于直线位移测量的新型变耦型时栅位移传感器,然后,通过系统的仿真分析,研究了不同测头姿态下传感器的误差特性,并通过实验进行了验证,为传感器实现高精度位移测量提供了一种新的解决方案。

2 变耦型时栅传感器的工作原理

变耦型时栅传感器由定尺和动测头两部分组成,其模型见图 1。定尺由导磁材料加工而成,其上开有矩形斜槽。动测头沿测量方向上分布有两个完全相同的独立测头,测头一和测头二,并通过

非导磁的联接板固定。两独立测头各自包含导磁铁芯、激励线圈和感应线圈,且激励线圈和感应线圈以多匝形式绕在各自导磁铁芯突出的 4 颗矩形齿上。其中,激励线圈在 4 颗矩形齿上依次采用正-反-反-正(绕向)的串接方式绕制,感应线圈在 4 颗矩形齿上依次采用正-正-反-反的串接方式绕制。

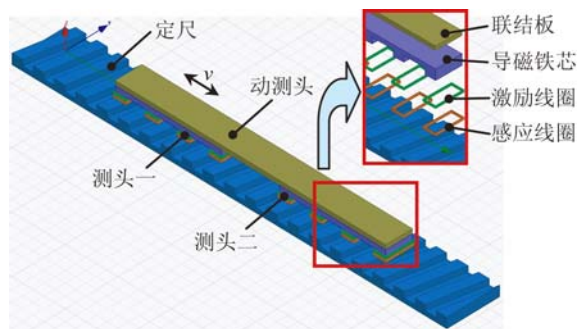


图 1 时栅传感器模型

Fig. 1 Time grating sensor model

定尺和两独立测头的导磁铁芯需满足的尺寸关系见图 2。图 2 中, W 为空间极距, β 为定尺斜槽角, n 取正整数。 n 越大,两测头间的相互影响越小。

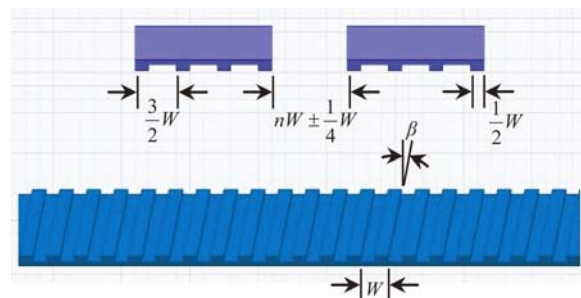


图 2 定尺和两动测头的尺寸关系

Fig. 2 Dimension relationship of ruler and two sensor-heads

当动测头沿测量方向运动时,动测头和定尺

间的气隙磁导将发生变化。只考虑气隙磁导变化中的恒定分量及基波分量时,动测头两独立测头各齿下的磁导变化规律为:

$$\lambda_{A_i} = k(x) \left\{ \lambda_0 + \lambda_{M1} \cos \left[\frac{2\pi x}{W} + (i-1) \cdot 3\pi \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\lambda_{B_i} = k(x) \left\{ \lambda_0 + \lambda_{M1} \sin \left[\frac{2\pi x}{W} + (i-1) \cdot 3\pi \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: λ_0 为恒定分量; λ_{M1} 为基波分量幅值; i 为两独立测头各齿齿号,依次取 $i=1,2,3,4$; $k(x)$ 为磁场耦合系数,与斜槽角 β 有关。若定尺斜槽角满足:

$$\beta = \arctan(W/4M), \quad (3)$$

则 $k(x)$ 为一常数,若 β 不满足式(3),则 $k(x)$ 为周期等于 $W/4$ 的周期函数。式中: M 为动测头宽度。

两独立测头各齿上所绕激励线圈与感应线圈间的互感抗与磁导变化规律相同,在满足式(3)时,有:

$$X_{A_i} = X_0 + X_{M1} \cos \left[\frac{2\pi x}{W} + (i-1) \cdot 3\pi \right], \quad (4)$$

$$X_{B_i} = X_0 + X_{M1} \sin \left[\frac{2\pi x}{W} + (i-1) \cdot 3\pi \right], \quad (5)$$

式中: X_0 为恒定分量; X_{M1} 为基波分量幅值。

由于激励线圈为正-反-反-正串接,感应线圈为正-正-反-反串接,故两独立测头感应线圈的输出电势分别为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{I}_{Aj} (X_{A1} - X_{A2} + X_{A3} - X_{A4}) = \\ & 4 \dot{I}_{Aj} X_{M1} \cos \left[\frac{2\pi x}{W} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_B &= \dot{I}_{Bj} (X_{B1} - X_{B2} + X_{B3} - X_{B4}) = \\ & 4 \dot{I}_{Bj} X_{M1} \sin \left[\frac{2\pi x}{W} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

式中: \dot{I}_A 和 \dot{I}_B 为两独立测头激励线圈通入的激励电流,若其分别为幅值恒定且时间正交的两相激励信号 $I_A = I_M \sin \left[\frac{2\pi t}{T} \right]$ 和 $I_B = I_M \cos \left[\frac{2\pi t}{T} \right]$,则根据式(6)和式(7)知,此时两测头感应线圈的输出电势为:

$$E_A = 4 I_M X_{M1} \sin \left[\frac{2\pi t}{T} \right] \cos \left[\frac{2\pi x}{W} \right], \quad (8)$$

$$E_B = 4 I_M X_{M1} \cos \left[\frac{2\pi t}{T} \right] \sin \left[\frac{2\pi x}{W} \right]. \quad (9)$$

将两独立测头的感应线圈串联,即可得到位

移测量所需的信号:

$$\begin{aligned} E &= E_A + E_B = \\ & 4 I_M X_{M1} \left[\sin \left[\frac{2\pi t}{T} \right] \cos \left[\frac{2\pi x}{W} \right] + \cos \left[\frac{2\pi t}{T} \right] \sin \left[\frac{2\pi x}{W} \right] \right] \\ &= E_M \sin \left[\frac{2\pi t}{T} + \frac{2\pi x}{W} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

后续电路对传感器输出信号的处理过程如图3所示。

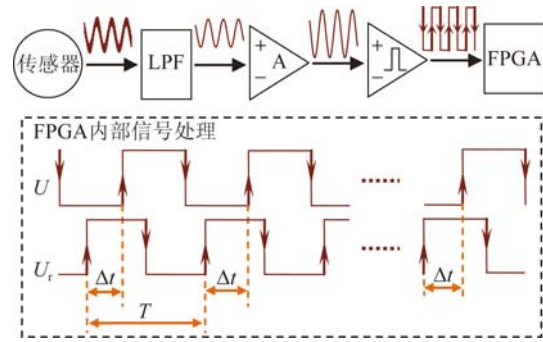


图3 传感器信号处理示意图

Fig. 3 Diagram of signal processing of sensor

图3中,传感器输出的信号经低通滤波、放大和过零比较后转换为方波信号送入FPGA,与参考的同频信号 U_r 进行鉴相。该相位差由高频时钟脉冲进行插补,计算后得到传感器输出信号 U 与参考信号 U_r 的时间差 Δt ,根据时间差得到动测头相对定尺的位移 x :

$$x = W \left[N + \frac{\Delta t}{T} \right], \quad (11)$$

式中: N 为动测头相对于定尺走过的完整极距数。

3 传感器不同测头姿态误差特性仿真

传感器在工作时,必须保证定尺和动测头的工作面(定尺工作面指定尺突出斜齿的上端面,动测头工作面指动测头导磁铁芯的下端面)与测量方向和被测运动平行,同时还应保证定尺和动测头工作面间的距离在重复安装时保持一致。

一般来说,定尺和动测头工作面需与被测运动平行,这是通过对定尺和动测头工作面与被测运动导向基准的平行度来保证的;定尺和动测头的测量方向与被测运动平行则是通过要求定尺和动测头侧向基准面(长侧面)与被测运动导向基准的平行度来保证的。

实际中,定尺和动测头的工作面与测量方向和被测运动是不可能严格平行的,定尺和动测头工作面间的距离在重复安装时也不可能保持完全一致。若以定尺 x 方向为测量方向和被测运动方向,则传感器动测头可能出现如下 5 种不同的姿态:动测头相对于定尺沿 y 轴或 z 轴偏移,动测头相对于定尺沿 x 轴、 y 轴或 z 轴旋转(分别称为滚转、俯仰和偏摆),如图 4 所示。上述不同的测头姿态,均会使传感器输出的感应信号产生非线性变化,从而使位移测量产生附加误差。因此,在上述不同测头姿态下对模型的电磁场进行仿真,分析传感器在不同测头姿态下的误差特性,可有效指导传感器的设计和安装,以更好地发挥传感器的性能。

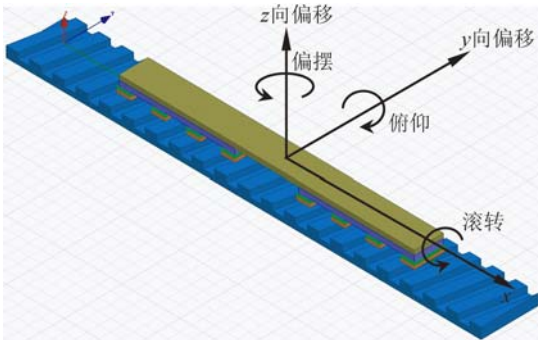


图 4 传感器的不同测头姿态

Fig. 4 Different attitudes of sensor-heads

3.1 有限元建模及参数设置

ANSYS 有限元分析软件有着强大的电磁场分析处理和求解功能,在实际工程中得到了广泛应用。本文利用 ANSYS 有限元分析软件 Ansoft Maxwell 进行仿真分析,并建立了如图 4 所示的传感器仿真模型。

仿真模型中,传感器的基本参数设置如下:空间极距 $W=4$ mm,动测头宽度为 5 mm,定尺宽度为 10 mm,动测头和定尺间的气隙厚度(动测头和定尺工作面间的距离)取为 d ,定尺斜槽深为 1 mm,动测头导磁铁芯突出矩形齿齿高为 1 mm,两独立测头的间距取为 9 mm,故动测头沿 x 方向的(测量方向)工作长度为 49 mm,沿 y 方向的工作长度为 5 mm。激励和感应线圈套于导磁铁芯突出的矩形齿上,横截面尺寸为 0.1 mm \times 0.1 mm,各 100 匝。两独立测头激励线圈中分别通入激励信号 $I_A=0.1\sin(2\pi \cdot 40\ 000t)$ A 和 $I_B=0.1\cos(2\pi \cdot 40\ 000t)$ A。激励线圈和感应

线圈材料设置为铜,导磁铁芯和定尺材料设置为纯铁,联结板材料设置为铝(实际中可选用硬度更高的铝合金)。设置励磁线圈和感应线圈网格的最大边长为 0.2 mm,设置导磁铁芯和定尺网格的最大边长为 0.4 mm,设置真空网格的最大边长为 5 mm。

仿真中,动测头运动位移均设置为 1 个空间极距 4 mm,运动步距为 0.1 mm,因此仿真结果得到的是动测头在 1 个空间极距的 40 个不同空间位置的感应信号。

3.2 偏移姿态下的误差特性仿真

一般来说,为了尽量消除边缘效应的影响,定尺宽度需大于动测头导磁铁芯的宽度,因此,动测头相对于定尺沿 y 方向的偏移对输出的影响极小。因此本文主要讨论动测头 z 向偏移下传感器输出信号的误差特性。

由仿真模型可知,动测头相对于定尺沿 z 向的偏移改变的实际是动测头和定尺工作面间的距离即气隙厚度 d 。图 5 为动测头和定尺在不同气隙厚度 d 下传感器感应线圈的输出仿真信号。

图 5(彩图见期刊电子版)中,感应线圈输出的感应电势为一条条初相角不同的正弦信号,不同初相角对应着动测头运动到不同的空间位置。由于仿真中设置动测头运动 1 个空间极距,因此对应初相角刚好变化 360° 。

比较图 5(a)~(d)可知,动测头和定尺间的气隙厚度 d 越大,感应信号越小。为获得不同气隙厚度下传感器输出信号的非线性误差,找出其误差特性,计算图 5(a)~(d)中每条正弦曲线的初相角,并与理论初相角(相邻两条正弦曲线的理论初相角应相差 $360^\circ/40=9^\circ$)相减,得到动测头在各空间位置的初相角误差,最后将其转换为对应的位移误差,如图 6 所示。

由图 6 可知,当动测头和定尺间具有不同气隙厚度时,位移误差的变化规律相似,均以 4 次误差为主。当动测头和定尺间的气隙厚度 $d=0.2$ mm 时,传感器输出信号的峰峰值约为 19 V,此时位移总误差的峰峰值约为 $20.5 \mu\text{m}$;当 $d=0.3$ mm 时,传感器输出信号的峰峰值约为 12 V,此时位移总误差的峰峰值约为 $15.9 \mu\text{m}$;当 $d=0.4$ mm 时,传感器输出信号的峰峰值约为 8 V,此时位移总误差的峰峰值约为 $16.2 \mu\text{m}$;当 $d=0.5$ mm 时,传感器输出信号的峰峰值约为 6 V,此时位移总误差的峰峰值约为 $15.6 \mu\text{m}$ 。由此可见,当动测头和定尺间的

气隙厚度在 0.3 mm 时,既能获得较大的输出信号,又不致产生较大的位移误差。

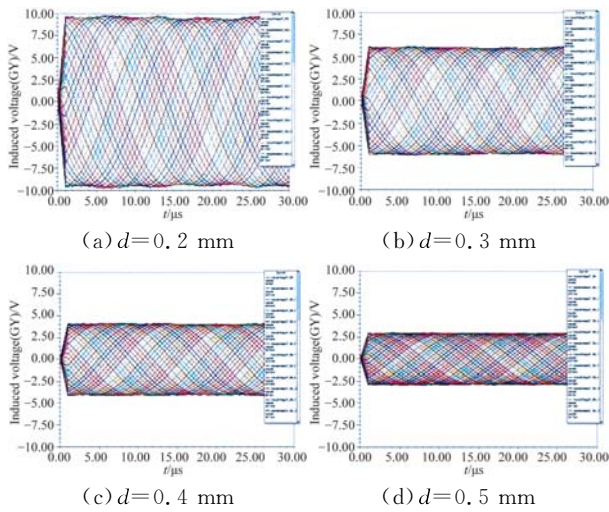


图 5 不同气隙厚度下的仿真结果

Fig. 5 Simulation results when ruler and sensor-head have different gaps

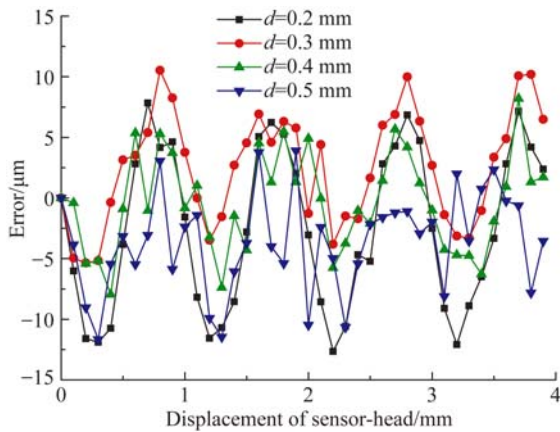


图 6 不同气隙下动测头各位置的位移误差

Fig. 6 Displacement errors when the ruler and sensor-head have different gaps

3.3 俯仰姿态下的误差特性仿真实验

俯仰姿态下,动测头工作面相对于定尺工作面有一个绕 y 轴旋转的倾角 θ_y (见图 7),此时传感器输出信号的幅值将发生变化,使位移测量产生附加误差。实际安装中,对测头俯仰角度的调整通常是通过控制动测头沿 x 方向(工作长度)上倾角 θ_y 对应 z 轴方向的变化高度 H_1 来实现的。

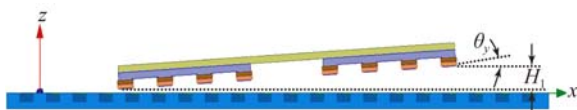


图 7 测头俯仰示意图

Fig. 7 Pitch attitude diagram of sensor-head

图 8(彩图见期刊电子版)为 H_1 分别取 0.02 mm 和 0.04 mm,且动测头和定尺最小气隙厚度为 0.3 mm 时传感器感应线圈的输出仿真信号。

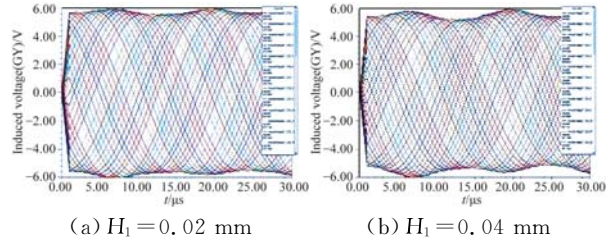


图 8 不同俯仰姿态下模型的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of model in different pitch attitudes

同样计算图 8(a)和(b)中每条正弦曲线的初相角和初相角误差,将其转换为对应的位移误差,如图 9 所示。

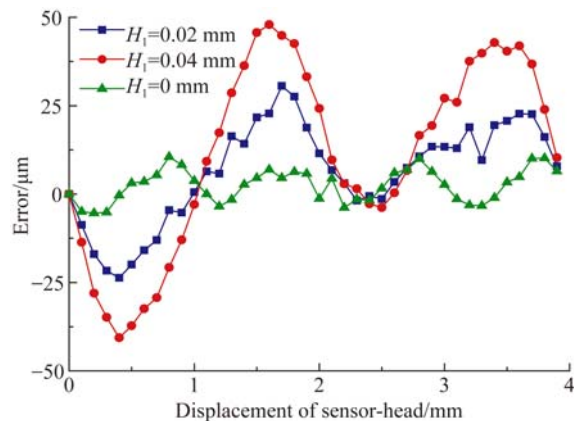


图 9 不同俯仰姿态下动测头各位置的位移误差

Fig. 9 Displacement errors of model with sensor-heads under different pitch attitudes

由图 9 可知,动测头和定尺不平行会产生安装俯仰,从而使位移测量产生较大的附加误差。当 $H_1=0.02$ mm 时,位移总误差的峰峰值约为 $54.3 \mu\text{m}$,当 $H_1=0.04$ mm 时,位移总误差的峰峰值约为 $88.6 \mu\text{m}$ 。俯仰越大,位移测量产生的附加误差也越大。

3.4 偏摆姿态下的误差特性仿真

偏摆姿态下,动测头工作面相对于定尺工作面有一个绕 z 轴旋转的倾角 θ_z (见图 10),也会使传感器输出信号的幅值发生变化,产生附加位移测量误差。实际安装中,对测头偏摆的控制通常是通过控制动测头沿 x 方向(工作长度)上倾角 θ_z 对应 y 轴方向的变化高度 H_2 来实现的。

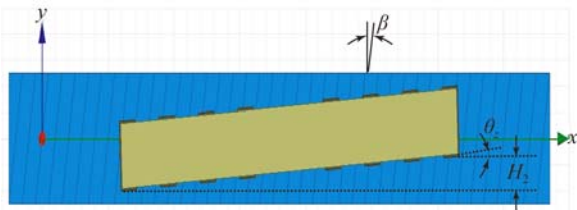


图 10 测头偏摆示意

Fig. 10 Yaw deviation diagram of sensor-head

由于定尺为开斜槽的矩形齿,因此,动测头相对于定尺的偏摆方向不同对输出信号的影响也不同。图 11 为不同偏摆下,动测头和定尺间最小气隙厚度为 0.3 mm 时模型的仿真结果。

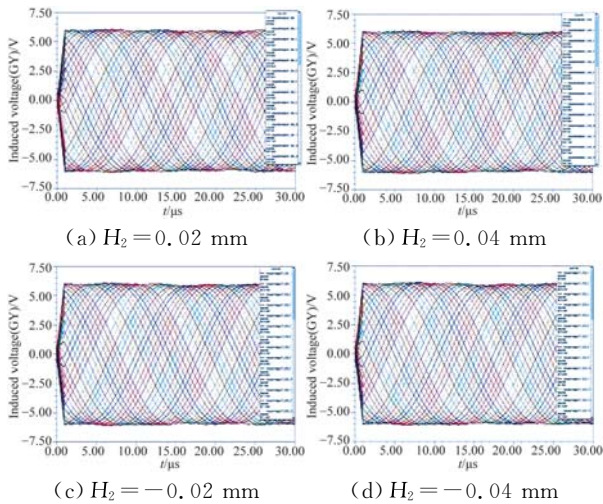


图 11 不同偏摆下模型的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of sensor-head in different yaw deviations

仿真中, H_2 为正,表示动测头相对于定尺的偏摆方向与图 10 相同; H_2 为负,表示动测头相对于定尺的偏摆方向与图 10 相反。计算图 11(a)~(d) 中每条正弦曲线的初相角和初相角误差,并将其转换为对应的位移误差,如图 12 所示。

由图 12(彩图见期刊电子版)可知,动测头和定尺不平行,会产生安装偏摆,但位移测量产生的附加误差极小。当 $H_2 = 0.02$ mm 时,位移总误差的峰峰值约为 $20.0 \mu\text{m}$; 当 $H_2 = 0.04$ mm 时,位移总误差的峰峰值仍约为 $20.0 \mu\text{m}$; 当 $H_2 = -0.02$ mm 时,位移总误差的峰峰值约为 $18.2 \mu\text{m}$; 当 $H_2 = -0.04$ mm 时,位移总误差的峰峰值约为 $16.8 \mu\text{m}$ 。可以看出,偏摆对位移总误差的影响并不大,仅使位移误差发生极小变化,但这种微小的变化也可能是由于仿真时网格划分

不对称、网格边长过大或者计算各行波初相角时引入的各种误差引起的。

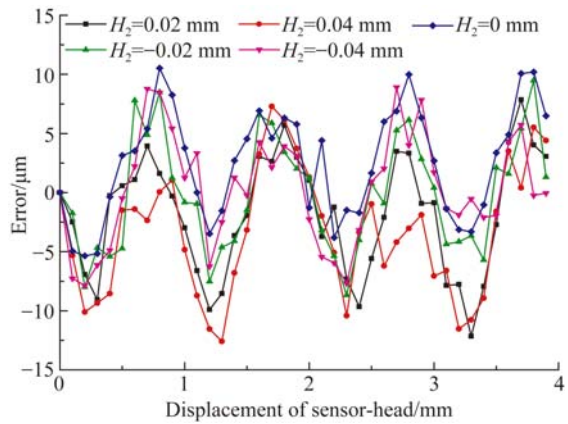


图 12 不同偏摆下动测头各位置的位移误差

Fig. 12 Displacement error of model when sensor-head in different yaw deviations

3.5 滚转姿态下的误差特性仿真

滚转姿态下,动测头工作面相对于定尺工作面有一个绕 x 轴旋转的倾角 θ_x (见图 13),也会使位移测量产生附加误差。实际安装中,对测头滚转的控制通常是通过控制动测头沿 y 向(工作长度)上倾角 θ_x 对应 z 轴方向的变化高度 H_3 来实现的。

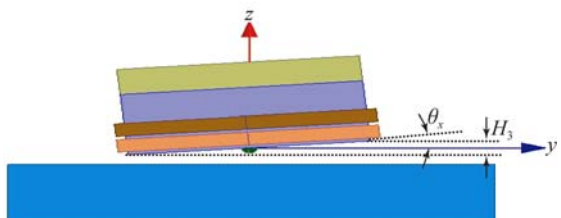


图 13 安装滚转示意图

Fig. 13 Diagram of sensor-head rotating around x -axis

图 14 为动测头中心和定尺最小气隙厚度为 0.3 mm 时,不同滚转姿态下模型的仿真结果。

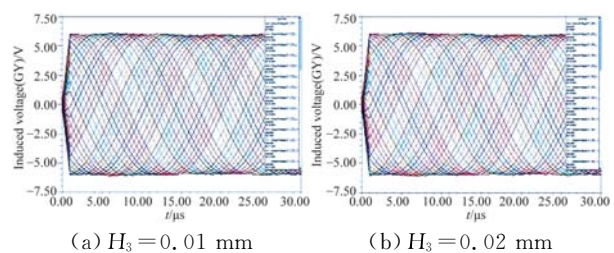


图 14 不同滚转姿态下模型的仿真结果

Fig. 14 Simulation results of model when sensor-head under different rotation angles around x -axis

计算图 14(a)和 14(b)中各条正弦曲线的初相角和初相角误差,并将其转换为对应的位移误差,如图 15 所示。

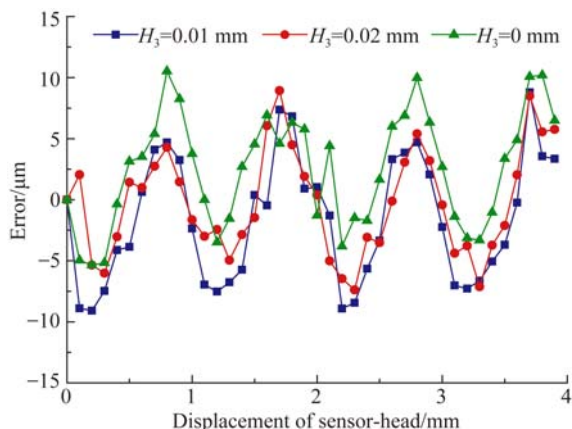


图 15 不同滚转姿态下动测头各位置的位移误差
Fig. 15 Displacement error of model when sensor-head under different rotation angles around x -axis

由图 15 可知,动测头和定尺不平行,会产生安装滚转,位移测量产生的附加误差也极小。当 $H_3 = 0.01 \text{ mm}$ 时,位移总误差的峰峰值约为 $17.9 \text{ } \mu\text{m}$;当 $H_2 = 0.02 \text{ mm}$ 时,位移总误差的峰峰值仍为 $16.3 \text{ } \mu\text{m}$ 。随着滚转角变大,位移总误差反而略有减小,当然,这种微小变化也可能是由仿真时网格划分不对称、网格边长过大或者计算各行波初相角时引入的误差引起的。

3.6 不同测头姿态下的误差特性比较

为综合比较且进一步研究不同测头姿态下的误差特性,对图 6、图 9、图 12、图 15 中各条位移误差曲线进行 FFT 分析,得到不同测头姿态下位移误差各次谐波的幅值和相角。其中,各曲线幅值较大的前 10 次谐波的幅值和相角如表 1 所示。

表 1 不同测头姿态下误差主要频次的幅值和相角仿真结果比较

Tab. 1 Comparison of simulation results of amplitude and phase in main error harmonics with sensor-head at different attitudes

	不同气隙厚度 d				不同俯仰 $H_1 (d=0.3 \text{ mm})$		不同偏摆 $H_2 (d=0.3 \text{ mm})$				不同滚转 $H_3 (d=0.3 \text{ mm})$	
	0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.02 mm	0.04 mm	0.02 mm	0.04 mm	-0.02 mm	-0.04 mm	0.01 mm	0.02 mm
1次 幅值/ μm	0.117	0.441	0.653	1.316	9.899	18.251	0.653	0.766	0.266	0.361	0.494	0.723
相角/ $^\circ$	34.59	-164.96	-163.366	77.13	138.42	134.04	-59.29	-146.18	-22.75	-163.60	-175.79	-41.35
2次 幅值/ μm	0.334	0.896	0.374	1.290	15.931	31.928	1.936	3.345	0.530	2.717	0.597	1.150
相角/ $^\circ$	119.40	144.37	-24.89	123.91	90.07	90.74	3.89	17.94	107.56	170.78	43.34	53.39
3次 幅值/ μm	0.227	0.853	0.669	1.053	0.675	0.878	0.500	0.965	0.223	0.254	0.187	0.971
相角/ $^\circ$	42.41	78.52	86.03	168.18	39.53	-56.14	-131.70	159.42	166.38	166.46	169.56	-41.38
4次 幅值/ μm	9.098	5.826	4.666	2.476	5.259	3.890	6.124	6.030	6.082	5.260	6.740	5.439
相角/ $^\circ$	88.81	91.23	77.18	98.98	81.52	95.36	85.88	84.71	87.16	90.36	87.14	84.83
5次 幅值/ μm	0.666	1.004	0.324	1.470	0.273	0.242	1.545	0.749	0.492	0.209	0.226	0.261
相角/ $^\circ$	-13.33	109.34	-157.52	-56.01	128.01	88.09	128.60	16.58	44.19	-7.64	141.55	76.87
6次 幅值/ μm	0.515	0.551	0.177	0.932	0.697	0.110	0.569	0.840	0.317	0.368	0.304	0.485
相角/ $^\circ$	-87.55	-122.71	8.20	-54.06	152.82	-96.46	-119.16	156.87	-40.63	-25.66	27.58	141.18
7次 幅值/ μm	0.751	1.146	0.054	0.885	0.796	0.677	0.423	0.246	0.074	0.376	0.786	0.565
相角/ $^\circ$	-18.70	124.55	155.95	46.85	-47.47	-17.23	92.28	4.70	51.15	-154.07	132.06	6.48
8次 幅值/ μm	0.161	0.768	0.824	1.651	0.835	0.191	0.550	1.348	0.609	0.132	0.642	0.464
相角/ $^\circ$	40.47	81.084	-84.26	-28.00	-145.18	149.35	-77.23	9.79	-122.799	99.39	135.78	-143.40
9次 幅值/ μm	0.692	0.203	1.060	0.303	0.709	1.403	1.173	0.350	1.040	0.455	0.464	0.196
相角/ $^\circ$	-138.92	18.196	-113.62	-62.26	-4.17	-111.05	-31.61	53.81	168.68	-107.15	86.50	-141.85
10次 幅值/ μm	0.512	0.248	0.698	1.018	0.249	0.466	0.044	0.745	0.362	0.319	0.619	1.101
相角/ $^\circ$	-60.44	-121.541	-43.50	7.89	-106.48	-17.30	43.07	-53.69	-23.06	8.68	-70.18	-45.82

由表 1 可知,测头俯仰姿态下,会使位移测量产生较大的 1 次和 2 次附加误差。当 $H_1 = 0.02 \text{ mm}$ 时,由测头俯仰产生的位移测量 1 次附加误差约为 $9.5 \mu\text{m}$,2 次附加误差约为 $15 \mu\text{m}$;当 $H_1 = 0.04 \text{ mm}$ 时,由测头俯仰产生的位移测量 1 次附加误差约为 $17.8 \mu\text{m}$,2 次附加误差约为 $31 \mu\text{m}$ 。俯仰角越大,1 次和 2 次附加误差也越大。测头偏摆和测头滚转引入的各次附加误差均较小,在控制测头偏摆高度 H_2 不超过 0.04 mm 和测头滚转高度 H_3 不超过 0.02 mm 时,由偏摆和滚转引起的各次位移测量附加误差均不会超过 $3 \mu\text{m}$ 。因此,安装传感器时,应尽量控制测头不发生俯仰,以避免产生较大的位移测量附加误差。

4 实验验证与分析

根据仿真分析的结果,加工了图 16 的定尺和动测头(尺寸参数与前述仿真模型一致)。其中,定尺和动测头的导磁铁芯采用慢走丝线切割工艺加工而成,同时,对定尺底面和侧面,以及导磁铁芯的工作面进行磨削加工,以保证其平面度均小于 $0.002/200 \text{ mm}$ 。加工完成后,通过联结板将两独立测头的导磁铁芯固定并安装于动测头壳体内。激励线圈和感应线圈采用特制的双线并绕矩形线圈(各 100 匝,直流阻抗约为 9Ω),套于导磁铁芯的矩形齿上,并根据模型中的绕向要求进行串接。

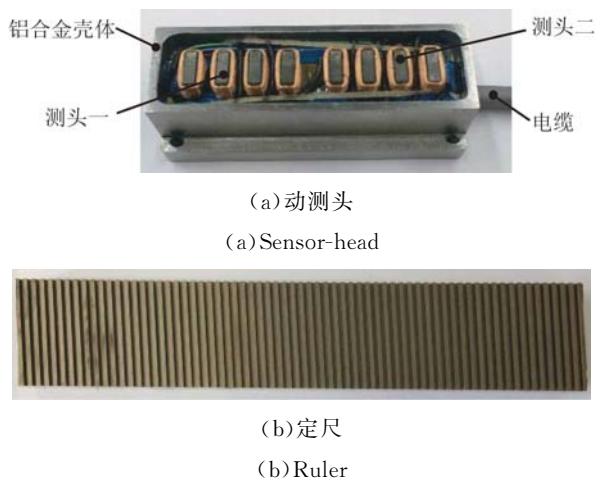


图 16 动测头和定尺实物

Fig. 16 Physical maps of ruler and sensor-head

4.1 实验验证

搭建了图 17 所示的实验平台,进行位移测量。图 17 中,时栅传感器的定尺固定在花岗石平台上,动测头则安装于 AEROTECH 精密直线气浮平台上,通过驱动装置控制动测头相对定尺的直线运动。通过信号处理电路对动测头的输出信号进行位移解算,并送入计算机显示。



图 17 实验平台

Fig. 17 Experiment platform

采用 RENISHAW XL-80 激光干涉仪作为参考标准器,检验不同测头姿态下的位移测量误差。为减小随机误差的影响,以下数据均为 5 次测量的平均值。

实验中,首先安装好定尺,为获得动测头和定尺不同气隙厚度下的误差特性,安装动测头时,保证在其工作长度上俯仰不超过 0.004 mm ,偏摆不超过 0.004 mm ,滚转不超过 0.002 mm 。然后调整定尺和动测头间的气隙厚度,使动测头工作面中心到定尺工作面的距离分别为 0.2 、 0.3 、 0.4 和 0.5 mm 。图 18 为时栅传感器在不同气隙厚度下动测头运动 1 个空间极距的测量数据与 RENISHAW ML80 激光干涉仪测得数据比对后的结果。

重新安装动测头,保证在测头工作长度上的偏摆不超过 0.004 mm ,滚转不超过 0.002 mm ,但俯仰高度 H_1 约等于 0.02 mm 和 0.04 mm 。图 19 为动测头运动 1 个空间极距的测量数据与 RENISHAW ML80 激光干涉仪测得数据比对后的结果。由图 19 可知,测头俯仰姿态下,引入了较大的位移测量附加误差。

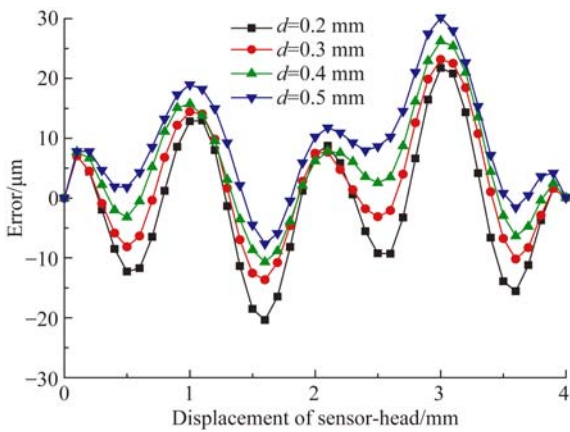


图 18 不同气隙厚度下位移误差实验数据

Fig. 18 Experiment data of displacement error when ruler and sensor-head have different gaps

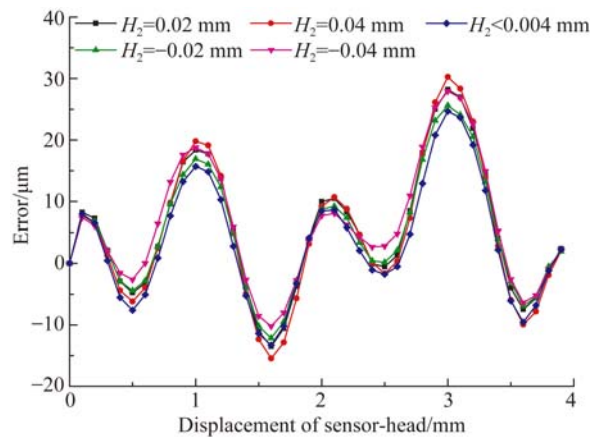


图 20 不同偏摆姿态下的测量误差

Fig. 20 Displacement error of physical sensor-head under different yaw attitudes

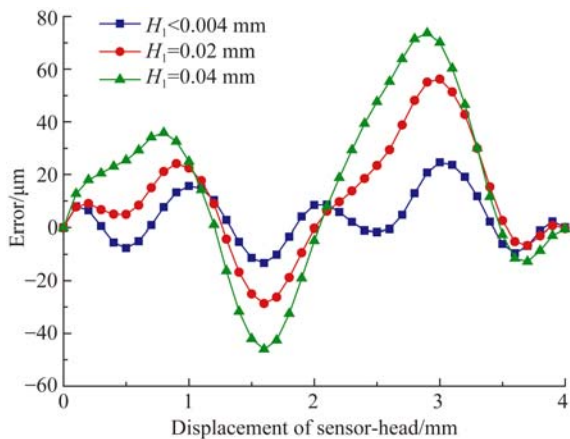


图 19 不同俯仰姿态下的测量误差

Fig. 19 Displacement error of physical sensor-head under different pitch attitudes

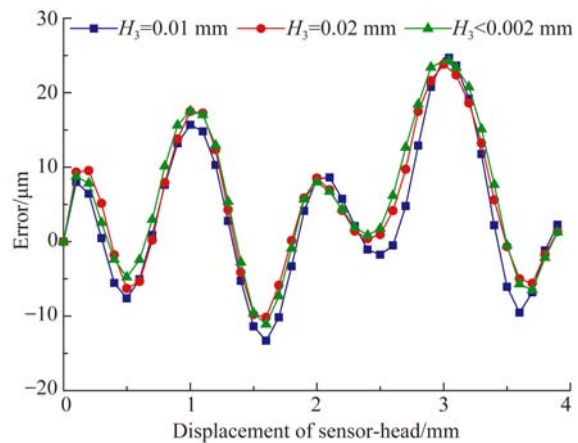


图 21 不同滚转俯仰姿态下的测量误差

Fig. 21 Displacement error of physical sensor-head under different rotation angles around x -axis

再次安装动测头,保证在测头工作长度上的俯仰不超过 0.004 mm,滚转不超过 0.002 mm,但偏摆高度 H_1 分别约等于 0.02、0.04、-0.02 和 -0.04 mm。图 20 为动测头运动 1 个空间极距的测量数据与 RENISHAW ML80 激光干涉仪测得数据比对后的结果。

最后调整动测头,保证在测头工作长度上的俯仰不超过 0.004 mm,偏摆不超过 0.004 mm,但滚转高度约等于 0.01 mm 和 0.02 mm。图 21 为动测头运动 1 个空间极距的测量数据与 RENISHAW ML80 激光干涉仪测得数据比对后的结果。

表 2 为各种不同测头姿态下误差主要频次的幅值和相角。

4.2 实验结果分析

比较表 1 和表 2 的结果,可知:

(1)与仿真结果相比,表 2 中实际测量误差的 1 次、2 次和 4 次幅值明显增大,这是由于仿真中动测头两独立测头(测头一和测头二)的一致性较好(无加工误差,两独立测头完全一样),而实际加工出来两独立测头的一致性相对较差(存在加工误差,两独立测头并不完全一样)所致,从而也说明测头的一致性对 1 次、2 次和 4 次谐波的影响较大,对其余各次谐波的影响较小。

表 2 不同测头姿态下误差主要频次的幅值和相角实验结果比较

Tab. 2 Comparison of experimental results of amplitude and phase in main error harmonics with sensor-head at different attitudes

	不同气隙厚度 d				不同俯仰 $H_1 (d=0.3 \text{ mm})$		不同偏摆 $H_2 (d=0.3 \text{ mm})$				不同滚转 $H_3 (d=0.3 \text{ mm})$	
	0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.5 mm	0.02 mm	0.04 mm	0.02 mm	0.04 mm	-0.02 mm	-0.04 mm	0.01 mm	0.02 mm
1次 幅值/ μm	3.245	3.756	4.322	4.493	16.467	22.383	4.212	4.334	3.957	3.887	3.864	4.125
相角/ $^\circ$	178.20	181.74	177.49	189.59	168.52	165.15	181.36	182.71	181.12	181.77	181.23	181.86
2次 幅值/ μm	5.845	7.227	8.317	8.938	22.992	38.277	8.699	9.535	8.015	9.555	7.261	8.540
相角/ $^\circ$	-66.95	-75.56	-69.53	-69.96	-56.61	-39.76	-74.49	-73.65	-74.13	-74.02	-77.51	-76.63
3次 幅值/ μm	0.675	1.069	1.118	0.623	0.886	1.068	1.145	1.092	1.018	1.068	0.942	0.883
相角/ $^\circ$	-78.45	-65.14	-72.36	264.92	-61.61	-73.93	-72.56	-79.54	-69.49	-65.15	-17.89	-41.57
4次 幅值/ μm	13.470	10.604	8.644	7.571	10.089	8.631	10.909	12.052	9.756	9.151	9.170	8.819
相角/ $^\circ$	68.37	70.41	69.35	69.73	71.59	72.29	68.97	68.38	69.91	71.94	76.06	71.22
5次 幅值/ μm	0.885	0.243	0.513	1.008	0.307	0.019	0.851	0.702	0.745	0.242	2.432	1.958
相角/ $^\circ$	217.15	-26.528	117.12	227.10	-3.19	228.54	267.34	236.75	-74.97	-26.49	-27.90	-23.87
6次 幅值/ μm	0.651	0.102	0.356	0.299	0.041	0.106	0.221	0.162	0.191	0.101	0.349	0.737
相角/ $^\circ$	237.73	112.45	-42.81	216.23	143.62	91.47	3.78	-34.62	39.69	112.00	-45.82	73.66
7次 幅值/ μm	0.582	0.445	0.653	0.968	0.469	0.543	0.569	0.491	0.552	0.583	0.663	0.523
相角/ $^\circ$	-60.57	-55.54	-58.22	-59.51	-59.74	-40.44	-69.19	-67.51	-62.06	-57.47	-48.59	-43.78
8次 幅值/ μm	0.527	0.589	0.705	0.556	0.590	0.692	0.781	0.690	0.776	0.703	0.767	0.815
相角/ $^\circ$	245.41	243.22	245.61	248.37	234.98	245.87	247.27	243.18	247.71	246.23	247.74	241.44
9次 幅值/ μm	0.611	0.698	0.633	0.692	0.728	0.670	0.643	0.784	0.673	0.662	0.689	0.522
相角/ $^\circ$	-89.15	-91.89	-81.52	-86.20	256.86	264.57	-81.52	-86.68	-89.48	267.30	262.60	-79.66
10次 幅值/ μm	0.322	0.167	0.373	0.640	0.128	0.131	0.393	0.394	0.369	0.191	0.273	0.384
相角/ $^\circ$	-77.73	-24.03	-78.87	-70.43	-41.64	-3.21	-56.39	-81.81	-58.62	-36.74	264.98	-83.45

(2)气隙厚度越大,位移误差 1 次和 2 次谐波的幅值越大,4 次谐波的幅值越小;俯仰高度变大,位移误差 1 次和 2 次谐波的幅值增大的非常快,但 4 次谐波的幅值略有减小;相比较而言,不同偏摆和不同滚转对测量误差的影响较小,偏摆对 2 次误差幅值的影响相对较大,而滚转对各次谐波幅值的影响均更小。

(3)位移误差除 1 次、2 次和 4 次谐波外,其余各次谐波的幅值均较小,这与仿真结果相似,而且测量数据均为 5 次测量的平均值,消除了部分随机误差的影响。

(4)仿真中虽然测头的一致性较好,但和实际测量结果相比,除 1 次、2 次和 4 次谐波幅值相差较大外,其余各次谐波的幅值与实际测量结果差

不多,这是由于仿真结果中还包含了一些其他误差,如仿真时网格划分不对称、网格边长过大引起的误差等等。

5 结 论

通过对时栅传感器原理的进一步分析,本文提出了一种新型的变耦型时栅直线位移传感器。传感器采用同时绕有激励和感应线圈的两个独立测头组成的动测头相对定尺做空间运动,实现了将两路驻波信号合成为行波信号,进行位移测量,系统成本低廉、极易制造。

对传感器不同测头姿态下的误差特性进行了仿真研究,并进行了实验验证。仿真和实验结果

均表明,各种测头姿态下,对位移误差的1次、2次和4次谐波均影响较大,对其余各次谐波的影响较小。其中,俯仰姿态下,传感器引入的附加误差最大,而不同气隙厚度、不同偏摆和不同滚转姿态下,传感器引入的附加误差相对较小。仿真结果与实验结果基本一致,因此,为保证传感器的精度,应着重控制传感器测头的俯仰。

最终实验结果表明,在较好的安装条件下,即

气隙厚度约为0.3 mm,并控制俯仰不超过0.004 mm,偏摆不超过0.004 mm,滚转不超过0.002 mm的情况下,传感器的原始精度可以达到 $\pm 18 \mu\text{m}$,且经过标定补偿后还能实现更高的精度。

上述系统的仿真和实验研究,验证了控制传感器的测头姿态可以提高传感器的测量精度。本文的研究结果可用于指导传感器的安装和误差分析。

参考文献:

- [1] 彭东林,刘小康,张兴红.高精度时栅位移传感器研究[J].机械工程学报,2005,41(12):126-129.
PENG D L, LIU X K, ZHANG X H. Research on high-precision time-grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 126-129. (in Chinese)
- [2] TANG Q F, PENG D L, WU L, et al.. An inductive angular displacement sensor based on planar coil and contrate rotor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(7): 3947-3954.
- [3] 彭东林,李彦,付敏,等.用于极端和特殊条件下机械传动误差检测的寄生式时栅研究[J].仪器仪表学报,2013,34(2):359-365.
PENG D L, LI Y, FU M, et al.. Study on parasitic time grating sensors used for mechanical transmission error measurement under harsh and special environment [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(2): 359-365. (in Chinese)
- [4] 孙世政,彭东林,武亮,等.时栅动态测量误差建模与补偿技术研究[J].机械工程学报,2014,50(22):10-15.
SUN SH ZH, PENG D L, WU L, et al.. Research on modeling and compensation technology for time-grating sensor's dynamic measurement errors [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(22): 10-15. (in Chinese)
- [5] 高忠华,彭东林.直线时栅测量系统的误差研究[J].电子测量与仪器学报,2013,27(1):15-20.
GAO ZH H, PENG D L. Study on error of linear time grating measurement system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(1): 15-20. (in Chinese)
- [6] 杨继森,李小雨,张静,等.时栅位移传感器动态误差模型及修正算法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(11):2548-2555.
YANG J S, LI X Y, ZHANG J, et al.. Study on the dynamic error model and correction algorithm of time grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(11): 2548-2555. (in Chinese)
- [7] 鲁进,陈锡侯,彭东林,等.基于双测头的时栅位移传感器自标定方法[J].仪表技术与传感器,2013,34(2):78-81.
LU J, CHEN X H, PENG D L, et al.. Research of self-calibration method for time grating displacement sensor based on two read heads [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013, 34(2): 78-81. (in Chinese)
- [8] 刘小康,彭凯,王先全,等.纳米时栅位移传感器的理论模型与误差分析[J].仪器仪表学报,2014,35(5):1136-1142.
LIU X K, PENG K, WANG X Q, et al.. Theoretical model and error analysis of nanometer time grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1136-1142. (in Chinese)
- [9] 汤其富,彭东林,武亮,等.时栅角位移传感器中的多普勒效应影响及其抑制方法研究[J].仪器仪表学报,2014,35(3):620-626.
TANG Q F, PENG D L, WU L, et al.. Study on the influence of Doppler effect and its suppressing method in time grating angular displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(3): 620-626. (in Chinese)
- [10] 刘小康,蒲红吉,郑方燕,等.纳米时栅位移传感器电场分布与误差特性研究[J].仪器仪表学报,2013,34(10):2257-2264.
LIU X K, PU H J, ZHENG F Y, et al.. Research on electric field distribution and error characteristics of the nanometer time grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(10): 2257-2264. (in Chinese)
- [11] 孙世政,陈锡侯,彭东林,等.嵌入式时栅传感器的动态自标定[J].光学精密工程,2014,22(10):2757-2764.

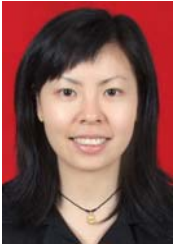
SUN SH ZH, CHEN X H, PENG D L, *et al.*. Dynamic self-calibration for embedded time grating sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2757-2764. (in Chinese)

- [12] 陈锡侯, 苟李, 官云丽, 等. 基于单个读数头的角位移传感器自标定方法[J]. *传感技术学报*, 2014, 27

(8): 1049-1053.

CHEN X H, GOU L, GUAN Y L, *et al.*. A self-calibration method of angular displacement sensor based on single reading head [J]. *Chinese Journal of Sensors And Actuators*, 2014, 27(8): 1049-1053. (in Chinese)

作者简介:



鲁 进(1980—), 女, 重庆人, 讲师, 2003年、2006年于重庆大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事精密测量与智能传感器方面的研究。E-mail: jinlu@cqut.edu.cn



陈锡侯(1976—), 男, 福建漳州人, 教授, 硕士生导师, 1999年、2004年、2007年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位, 主要从事精密测量与智能传感器方面的研究。E-mail: cxh0458@cqut.edu.cn

(本栏目编辑: 马 健)

(版权所有 未经许可 不得转载)